



**Escola Politècnica Superior  
de Castelldefels**

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

# **TREBALL DE FI DE CARRERA**

**TÍTOL: Elaboració i anàlisi d'imatges radar des de satèl·lit: monitorització de deformacions de terreny**

**TITULACIÓ: Enginyeria Tècnica de Telecomunicació, especialitat Sistemes de Telecomunicació**

**AUTORA: Laura Arroyo Clavell**

**DIRECTOR: Michele Crosetto**

**SUPERVISOR: Jaume Piera Fernández**

**DATA: 7 de juliol de 2006**

**Títol:** Elaboració i anàlisi d'imatges radar des de satèl·lit: monitorització de deformacions de terreny

**Titulació:** Enginyeria Tècnica de Telecomunicació, especialitat Sistemes de Telecomunicació

**Autora:** Laura Arroyo Clavell

**Director:** Michele Crosetto

**Supervisor:** Jaume Piera Fernández

**Data:** 7 de juliol de 2006

## Resum

Aquest projecte ha estat realitzat a l'Institut de Geomàtica en col·laboració amb la unitat de Teledetecció Activa, que treballa amb la tècnica de la interferometria SAR (Radar d'Obertura Sintètica).

Les tècniques interferomètriques aplicades sobre imatges SAR, captades des de plataformes orbitals o aerotransportades, tenen la capacitat de generar MNTs (Model Numèric del Terreny) d'alta qualitat. A més, permeten la mesura de moviments terrestres, mitjançant la interferometria diferencial (DInSAR).

Una de les fonts d'error a la mesura d'aquests moviments ve donada per la component atmosfèrica que presenta una sèrie de característiques influents a la recepció del senyal al satèl·lit.

Mitjançant una sèrie de paràmetres estadístics s'estima la component atmosfèrica de la fase interferomètrica diferencial, per tal de minimitzar els errors produïts a l'hora de calcular les deformacions del terreny.

L'objectiu d'aquest projecte pretén, a partir de la predicció associada a matrius de variances-covariances, eliminar la component atmosfèrica de la fase interferomètrica diferencial per poder aïllar la component de moviment.

El resultat de l'estudi és positiu, ja que s'aconsegueix estimar la component atmosfèrica sobre les zones observades de forma correcta, funcionant com a filtre pas baix i interpolant les zones on no hi ha informació segons les seves funcions d'autocovariança.

**Title:** Elaboration and analysis of radar images from satellite: Monitoring of land deformations

**Titulation:** Technical engineering of Telecommunications, speciality in Systems of Telecommunications

**Author:** Laura Arroyo Clavell

**Director:** Michele Crosetto

**Supervisor:** Jaume Piera Fernández

**Date:** July, 7th 2006

## Overview

This project has been made in the Institute of Geomatics in collaboration with the unit of Active Remote Sensing, which works with the interferometry SAR (Synthetic Aperture Radar).

The interferometric techniques applied over SAR images that are acquired by orbital or aero transported platforms have the availability to generate high quality DEMs (Digital Elevation Model). Besides, they allow the measurement of terrain movements by means of the differential interferometry (DInSAR).

One limitation in the measurement of these movements is the atmospheric component, whose characteristics are influential for the signal reception at the satellite.

With a group of statistical parameters it is possible to estimate the atmospheric component of the differential interferometric phase, in order to minimize the produced errors when calculating the terrain deformations.

The aim of this project tries to eliminate the atmospheric component from the differential interferometric phase with the prediction associated to variance-covariance matrixes to be able to isolate the movement component.

The result of the study is positive, because it is obtained the estimation of the atmospheric component over the observed zones correctly, in which the technique works as a low pass filter and interpolates areas where there is no information according to their functions of autocovariance.

# ÍNDIX

<b>INTRODUCCIÓ .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTOL 1. INTERFEROMETRIA SAR.....</b>	<b>2</b>
1.1. Principis de les tècniques InSAR i DInSAR .....	2
1.2. Influència de l'atmosfera a la interferometria SAR .....	4
1.2.1. No homogeneïtat atmosfèrica .....	4
1.2.2. Aspectes de la propagació d'ona .....	6
1.3. Estructura atmosfèrica .....	9
1.3.1. Ionosfera.....	10
1.3.2. Troposfera .....	10
1.4. Característiques de propagació a la interferometria SAR .....	11
1.4.1. Influència de la pluja.....	11
1.4.2. Influència dels núvols .....	12
1.4.3. Influència de la boira .....	13
1.4.4. Influència dels gasos atmosfèrics .....	14
<b>CAPÍTOL 2. ESTIMACIÓ DE LA COMPONENT ATMOSFÈRICA.....</b>	<b>15</b>
2.1 Zona d'observació per a l'estudi.....	15
2.2 Interpolació espacial .....	16
2.2.1 Kriging.....	17
2.3 Funció empírica d'autocovariança (EAF).....	22
2.4 Model de la funció d'autocovariança (MAF) .....	24
2.5 Espectre de Kolmogorov .....	26
2.6 Anàlisi i interpretació del resultat.....	28
<b>CAPÍTOL 3. REDUCCIÓ DELS EFECTES ATMOSFÈRICS.....</b>	<b>36</b>
3.1 Tècnica de filtratge i de predicció.....	36
3.2 Anàlisi i interpretació dels resultats.....	37
<b>CONCLUSIONS.....</b>	<b>43</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>45</b>
<b>ANNEX 1. FILTRATGE I PREDICCIÓ .....</b>	<b>48</b>
1.1 Exemple 1 .....	48

1.2	Exemple 2 .....	50
<b>ANNEX 2. FILTRES ESPACIALS .....</b>		<b>52</b>
2.1	Domini espacial .....	52
2.2	Domini freqüencial .....	52
2.3	Filtrat espacial.....	54
2.3.1	Filtre suavitzant .....	55
2.3.2	Filtre realçant .....	58
2.4	Exemple de pas baix per a l'estimació de la component atmosfèrica.....	60
<b>ANNEX 3. PROGRAMES .....</b>		<b>61</b>
3.1	Programa conversor BIN-ASCII (llenguatge C) .....	61
3.2	Programa conversor ASCII-BIN (llenguatge C) .....	63
3.3	Programa de filtres (llenguatge C).....	65



## INTRODUCCIÓ

La interferometria diferencial DInSAR és una de les tècniques que permet mesurar moviments del terreny, durant l'adquisició de les imatges SAR. La influència de les diferents condicions atmosfèriques provoca canvis a la recepció del senyal des de radar, que seran fonts d'error en el càlcul de les deformacions del terreny. L'objectiu d'aquest projecte és estimar el comportament de l'atmosfera, per tal de reduir els errors a la fase interferomètrica.

Al capítol 1, '*Introducció a la interferometria SAR*', es presenten les característiques bàsiques de la interferometria SAR i les diferències entre les tècniques SAR i DInSAR. Breument es descriuen les diferents components de la fase interferomètrica diferencial, dins la qual s'hi troba la component atmosfèrica, en què està basat aquest projecte. La propagació d'ona en comunicacions via satèl·lit es veu alterada per l'estructura atmosfèrica, sent la troposfera i la ionosfera les capes més crítiques.

Per a '*L'Estimació de la component atmosfèrica*', títol del segon capítol, es fa ús d'una anàlisi estadística relaciona el conjunt de píxels que formen un interferograma. Segons l'autocorrelació en funció de la distància és possible avaluar la influència de l'atmosfera en una mateixa imatge. A partir de diferents observacions s'extreu un model genèric que descriu el comportament atmosfèric.

Al capítol 3, '*Reducció dels efectes atmosfèrics*', es desenvolupa una tècnica de filtratge i de predicció mitjançant l'anàlisi estadístic del capítol anterior.

Finalment, a les conclusions es troben resumits els passos seguits al projecte amb els corresponents resultats obtinguts. També hi ha una valoració personal i una presentació de l'impacte ambiental derivat.

# CAPÍTOL 1. INTERFEROMETRIA SAR

El SAR (*Synthetic Aperture RADAR - Radio Detection and Ranging* -) és un sensor d'imatges d'alta resolució que proporciona observacions 2D de la Terra. És un sistema actiu (proporciona la seva pròpia il·luminació) i, per tant, pot realitzar operacions contínues dia i nit. A més, es basa en l'ús de microones, que poden penetrar els núvols, la boira i la pluja, afavorint la possibilitat de captar imatges sota qualsevol tipus de condició climàtica. També es caracteritza per ser un sistema coherent, que proporciona l'amplitud i la fase del senyal radar.

## 1.1. Principis de les tècniques InSAR i DInSAR

La interferometria SAR mesura les diferències en distància entre el satèl·lit i un punt de terra observat durant dues passades diferents del satèl·lit. La variació en distància pot ser deguda bàsicament a dos motius, dels quals es deriven dues aplicacions diferents. Per una banda, pot ser deguda a la diferència de posicions entre les dues trajectòries del satèl·lit, el qual ens permet mesurar la topografia del terreny, i, per altra banda, pot ser conseqüència d'un desplaçament de la zona observada entre les dues adquisicions. D'aquesta última aplicació es desprèn el principi bàsic que diferencia la interferometria SAR (InSAR) de la interferometria diferencial (DInSAR). Per a adquisicions amb trajectòries diferents es planteja el següent problema: el senyal degut a la deformació es troba barrejat amb el senyal topogràfic. Per a solucionar aquest problema sorgeix la interferometria diferencial, on el senyal topogràfic s'extreu mitjançant un model numèric del terreny (MNT) i s'obté la fase interferomètrica diferencial.

Les aplicacions de la interferometria SAR es poden resumir en tres grans grups: generació de MNT, mapes de deformacions i mapes temàtics. En aquest projecte, ens basarem en els mapes de deformacions.

A les aplicacions interferomètriques es consideren dues imatges de la mateixa zona adquirides en èpoques diferents i que poden haver sigut captades per dos satèl·lits diferents, o bé, pel sensor que ha realitzat diferents passades. Es denomina *master* a la primera adquisició i *slave* a la segona. Donat que les imatges han sigut adquirides des de posicions diferents, s'han d'expressar segons la mateixa geometria. Aquest procés s'anomena corregestració de les imatges.

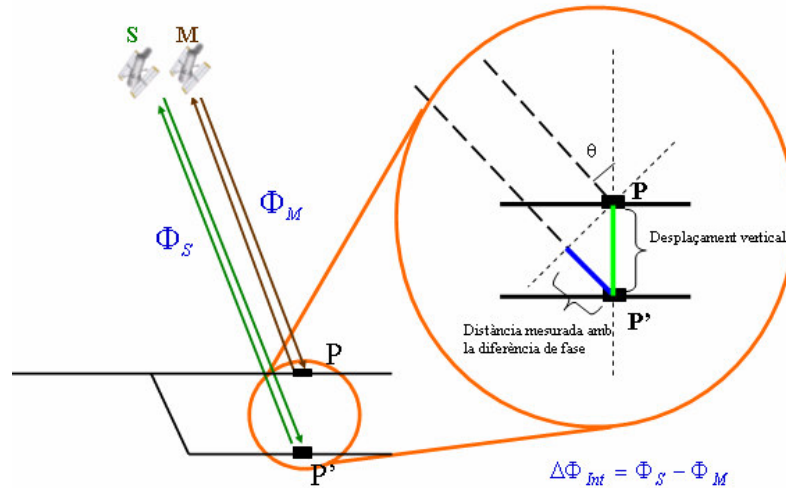
Una vegada corregestrades les imatges, es calcula la diferència de fase entre la *master* i la *slave*, anomenada fase interferomètrica,  $\Delta\Phi_{Int}$ , i que es pot desglossar en diferents components:

$$\Delta\Phi_{Int} = \Phi_S - \Phi_M = \Phi_{Topo} + \Phi_{Mov} + \Phi_{Atm} + \Phi_{Noise} \quad (1.1)$$



on:

$\Phi_S$  i  $\Phi_M$  són la fase de la *slave* i *master*, respectivament;  
 $\Phi_{\text{Topo}}$  és la component topogràfica;  
 $\Phi_{\text{Mov}}$  és la component deguda al moviment;  
 $\Phi_{\text{Atm}}$  és la component atmosfèrica, i  
 $\Phi_{\text{Noise}}$  és el soroll de la fase;



**Fig. 1.1** Fase interferomètrica diferencial SAR

Les dues possibles aplicacions geomètriques de la fase interferomètrica, comentades anteriorment; la generació del MNT (Model Numèric del Terreny) mitjançant InSAR, i la mesura de deformacions del terreny mitjançant DInSAR, tenen procediments diferents en la realització de les seves últimes etapes.

En el primer cas, si no es té deformació entre les dues passades del satèl·lit (i.e.  $\Phi_{\text{Mov}}=0$ ), si els efectes atmosfèrics són despreciables i el soroll és petit, la component topogràfica transmet principalment informació de la topografia del terreny i es pot, doncs, generar un MNT de la zona observada.

En el segon cas, l'objectiu és la mesura de deformacions del terreny. Per a calcular la fase interferomètrica diferencial  $\Phi_{D-Int}$  s'elimina la component topogràfica de la fase interferomètrica  $\Phi_{Int}$  mitjançant el MNT:

$$\Delta\Phi_{D-Int} = \Delta\Phi_{Int} - \Phi_{\text{Topo\_MNT}} = \Phi_{\text{Res\_Topo}} + \Phi_{\text{Mov}} + \Phi_{\text{Atm}} + \Phi_{\text{Noise}} \quad (1.2)$$

on:

$\Phi_{\text{Topo\_MNT}}$ , és la component topogràfica del MNT, i  
 $\Phi_{\text{Res\_Topo}}$ , és la component residual de la fase deguda a errors del MNT.

## 1.2. Influència de l'atmosfera a la interferometria SAR

Hi ha diferències entre la propagació del senyal al buit i a l'atmosfera. La major concentració de gasos es dona a la capa més baixa de l'atmosfera, anomenada troposfera, que s'estén des del nivell del mar fins a uns 10 km d'altitud aproximadament.

En condicions atmosfèriques normals la concentració de gasos disminueix amb l'altura, el que provoca una variació de l'índex de refracció de l'atmosfera en funció de l'altura. Per tant, l'atmosfera constitueix un medi de propagació no homogeni, el qual provoca una curvatura de les trajectòries de propagació o refracció. A més, la presència de gasos introdueix atenuació, especialment important a les freqüències de ressonància de les molècules d'oxigen i del vapor d'aigua, que són els gasos amb major presència a l'atmosfera. Finalment, incidències meteorològiques com la pluja poden introduir atenuacions addicionals en funció de la freqüència i la intensitat de la precipitació.

Un tercer element que s'ha de considerar a la propagació del senyal és la presència de la ionosfera. La ionosfera és una capa de l'atmosfera compresa entre els 50 i 2.000 km d'altitud per damunt de la superfície terrestre i que es caracteritza per contenir densitats importants de molècules ionitzades. La propagació per medis ionitzats està lligada a fenòmens de reflexió, absorció i refracció en funció de paràmetres com la freqüència i la densitat de ionització.

### 1.2.1. No homogeneïtat atmosfèrica

Les mesures de fase a les diferents adquisicions de la interferometria SAR es poden escriure com:

$$\begin{aligned}\varphi_1 &= \frac{4\pi}{\lambda} R_1 \\ \varphi_2 &= \frac{4\pi}{\lambda} (R_1 + B^{\parallel})\end{aligned}\tag{1.3}$$

on:

$\varphi_1$  és la fase de la primera adquisició;

$\varphi_2$  és la fase de la segona adquisició;

$R_1$  és la distància entre el sensor i l'objecte ("distància inclinada"), i

$B^{\parallel}$  és la component paral·lela de la base B, distància entre les dues adquisicions.

Es considera l'aproximació de camp llunyà, assumint que l'angle  $\theta$  és igual tant a la primera posició com a la segona. La fase interferomètrica  $\varphi_{\text{int}}$  es troba multiplicant el valor complex de la imatge 1 amb el conjugat de la imatge 2, que resulta ser una diferència de fases:

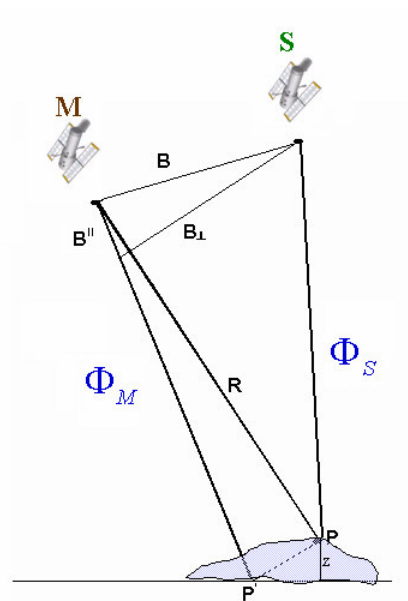
$$\varphi_{\text{int}} = \varphi_1 - \varphi_2 = -\frac{4\pi}{\lambda} B^{\parallel} \quad (1.4)$$

Un valor per a  $B^{\parallel}$  es calcula a partir de la relació geomètrica següent:

$$B^{\parallel} = B \sin(\theta - \alpha) \quad (1.5)$$

on:

$\alpha$  és la orientació de la base B.



**Fig. 1.2** Geometria de la fase interferomètrica diferencial SAR

Les distàncies inclinades són determinades a partir del temps  $\tau$  del senyal i la velocitat de la llum  $c$ , amb:

$$R = \frac{\tau \cdot c}{2} \quad (1.6)$$

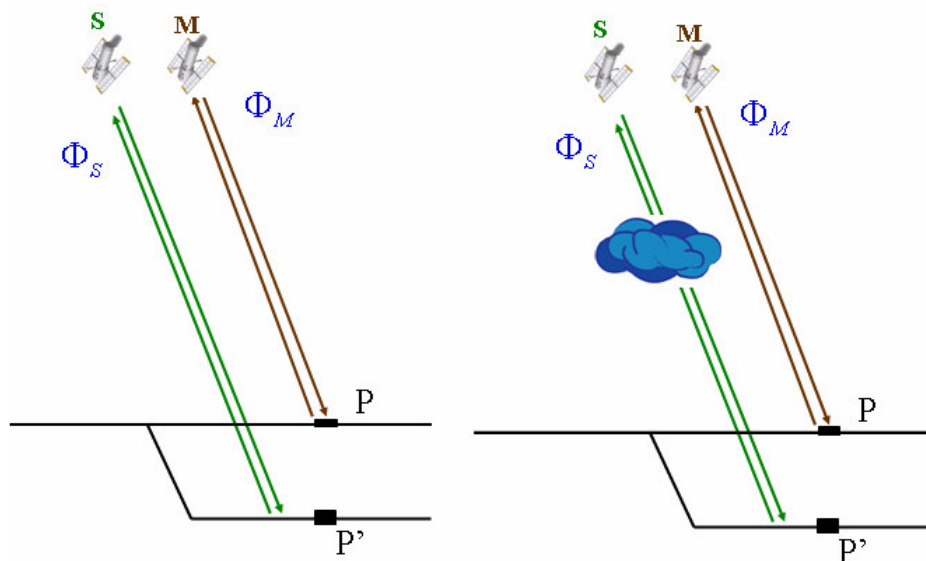
Com que la velocitat real de les ones de ràdio a l'atmosfera és menor que la velocitat al buit, s'introdueix un retard atmosfèric addicional que pot ser traduït com a distància d'excés  $\Delta R_e$  a les dues adquisicions [1]. La fase interferomètrica és finalment:

$$\begin{aligned}\varphi_1 &= \frac{4\pi}{\lambda}(R_1 + \Delta R_{e,1}) \\ \varphi_2 &= \frac{4\pi}{\lambda}(R_1 + B^{\parallel} + \Delta R_{e,2}) \\ \varphi_{\text{int}} &= \frac{4\pi}{\lambda}(-B^{\parallel} + \Delta R_{e,1} - \Delta R_{e,2})\end{aligned}\tag{1.7}$$

No obstant, no es pot assumir que l'atmosfera sigui un medi homogeni i isòtrop a tota la imatge SAR, perquè la velocitat de la llum real als diferents medis de l'atmosfera no és igual a tots els punts i direccions. Per aquest motiu s'analitzaran els diferents models de comportament atmosfèric.

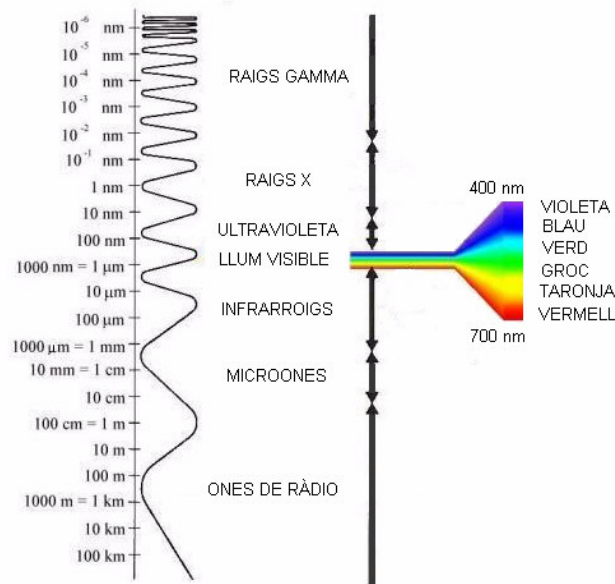
### 1.2.2. Aspectes de la propagació d'ona

Una ona és una pertorbació que avança o que es propaga en un medi material o, inclòs, al buit. En tot tipus d'ones, el medi juga un paper essencial sobre la propagació de la pertorbació. La velocitat de propagació del senyal dependrà de les característiques del medi.



**Fig. 1.3** Influència atmosfèrica a la interferometria SAR

Quan una ona arriba a la superfície de separació de dos medis de diferent naturalesa es produeixen, en general, dues noves ones, una que retrocedeix cap al medi de partida i l'altra que travessa la superfície límit i avança cap al segon medi. El primer fenomen es denomina reflexió i el segon rep el nom de refracció.



**Fig. 1.4** Espectre electromagnètic

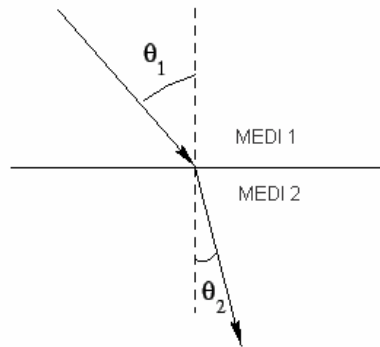
La regió de les microones es troba a les freqüències que van des de 1-30 GHz, i es veu influenciada per l'atmosfera degut a:

- els efectes dels gasos atmosfèrics i els canvis de l'índex de refracció
- els efectes de partícules líquides i sòlides (núvols, precipitacions, aerosols)

#### 1.2.2.1 Importància de l'índex de refracció

L'atmosfera pertorba la propagació de les ones electromagnètiques, de forma que a l'establir radiocomunicacions apareixen una sèrie de fenòmens que modifiquen les condicions ideals de la propagació al buit. Aquests fenòmens venen donats per l'índex de refracció.

L'índex de refracció a la propagació d'ones electromagnètiques pot traduir-se com a retard de la propagació, augment de la distància inclinada o velocitat més lenta [1].



**Fig. 1.5** Refracció del senyal per canvi de medi

L'índex de refracció de l'atmosfera varia en funció de la concentració de gasos. És per aquest motiu que, per a condicions normals, l'índex de refracció de l'aire és molt pròxim a la unitat. Per a facilitar els càlculs es defineix el coíndex de refracció  $N$  com:

$$N = (n - 1) \cdot 10^6 \quad [1] \quad (1.8)$$

Si es considera l'atmosfera com un gas ideal amb una certa concentració de vapor d'aigua, la refracció podria obtenir-se com:

$$N = 77,6 \frac{P}{T} + 3,73 \cdot 10^5 \frac{e}{T^2} \quad [1] \quad (1.9)$$

on:

$P$  és la pressió atmosfèrica en mbar;

$T$  és la temperatura absoluta en K, i

$e$  és la pressió parcial del vapor d'aigua en mbar.

Tant la pressió atmosfèrica com la temperatura i el contingut del vapor d'aigua són funció de l'altura. Per a un perfil atmosfèric mig la refracció varia exponencialment en funció de l'alçada. La UIT (Unió Internacional de Telecomunicacions) defineix com a atmosfera de referència aquella en què la refracció varia com:

$$N(h) = 315 e^{-0,136h} \quad [1] \quad (1.10)$$

on:

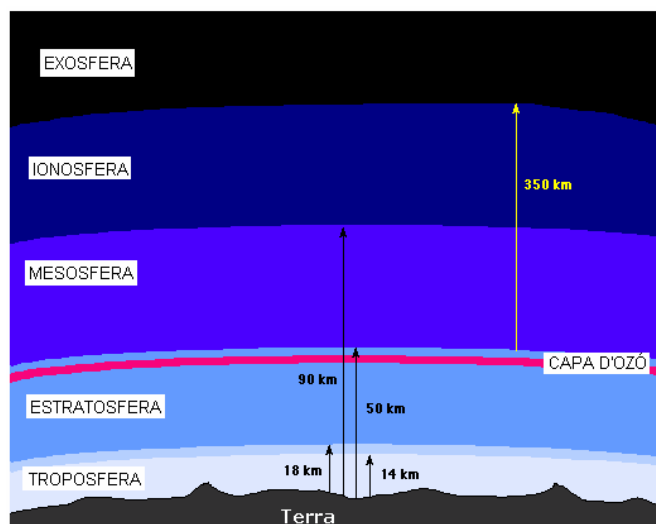
$h$  és l'altura en km.

### 1.3. Estructura atmosfèrica

L'atmosfera es divideix en diferents capes:

- **Troposfera:** és la zona més baixa de l'atmosfera. Es troba a una alçada de 12km sobre la superfície de la Terra i és on es produeixen tots els fenòmens meteorològics, com la formació dels núvols, la pluja i el vent. Conté la major proporció de vapor d'aigua que permet mantenir la calor procedent de la superfície terrestre. Els sers vius troben aquí l'aire compost per tots els gasos que necessiten per viure. La temperatura disminueix 1°C cada 180 metres a mida que es puja, fins a arribar als -56°C en el límit superior.
- **Estratosfera:** és la capa que es troba entre els 12 i els 90 km d'alçada. Els gasos es troben separats formant capes o estrats d'acord al seu pes. Una d'elles és la capa d'ozó que protegeix la Terra de l'excés dels raigs ultraviolats provinents del Sol. Les quantitats d'oxigen i anhídrid carbònic són quasi nul·les i augmenta la proporció d'hidrogen. Actua com a regulador de la temperatura, sent a la part inferior propera als -60°C disminuint amb l'altura fins als -80°C i torna a pujar lentament.
- **Mesosfera:** en aquesta capa trobem la ionosfera, que es troba entre els 90 i els 1.100 km d'altura. En ella existeixen capes formades per àtoms carregats elèctricament, anomenats ions. Al ser una capa conductora d'electricitat, és la que possibilita les transmissions de ràdio i televisió per la seva propietat de reflectir les ones. El gas predominant és l'hidrogen. Aquí es produeix la destrucció dels meteorits que arriben a la Terra. La seva temperatura augmenta des dels -73°C fins a arribar als 800°C.
- **Exosfera:** és la capa externa de la Terra que es troba per damunt dels 1.100 km d'altura. Està composta principalment per hidrogen i heli i les partícules disminueixen fins a desaparèixer. Degut a la baixa atracció gravitatòria algunes poden arribar a escapar a l'espai interplanetari. La seva temperatura diürna arriba als 2.500°C i la nocturna als -273°C corresponents al zero absolut.

Degut a les composicions químiques de cada una de les capes de l'atmosfera i de les propietats de propagació de les ones electromagnètiques al medi, les dues capes més influents per a comunicacions via satèl·lit són la ionosfera i la troposfera.



**Fig. 1.6** Capes de l'atmosfera

### 1.3.1. Ionosfera

La ionosfera està plena de partícules carregades. La seva distribució en mida i densitat de càrrega és variable en funció de la radiació solar, les fluctuacions de camp magnètic i altres factors.

La propagació de les ones electromagnètiques a la ionosfera es pot modelar a partir de la propagació en plasmes. Un plasma és una regió de l'espai, amb la permitivitat elèctrica i la permeabilitat magnètica del buit, que conté electrons lliures. Encara que la densitat de càrrega és variable temporal i espacialment, la ionosfera és considerada normalment com una closca esfèrica entre els 60 i els 600km d'alçada amb una densitat d'electrons constant en altura. Les ones de ràdio que travessen la ionosfera són retardades dispersament de les seves trajectòries per la interacció dels electrons lliures. Un retard dispersiu significa que el retard del senyal depèn de la freqüència, element clau per a estimar el retard ionosfèric (o plasma) per a aplicacions com GPS o altimetria radar.

### 1.3.2. Troposfera

L'absorció molecular dels gasos continguts a l'atmosfera i l'atenuació produïda per hidrometeors són les principals causes de l'atenuació atmosfèrica.

L'atenuació per absorció molecular es deu principalment a les molècules d'oxigen i de vapor d'aigua. Per a freqüències inferiors a 10GHz és pràcticament despreciable, mentre que a freqüències superiors presenta un comportament creixent amb la freqüència i l'atenuació associada a les freqüències de ressonància de les molècules.



En quant a l'atenuació per hidrometeors, és especialment important la pluja, ja que la boira, la neu i la pedra produeixen atenuacions molt menors a les bandes de 3-30 GHz (banda SHF) i inferiors. L'atenuació per pluja depèn de la intensitat i de factors com el tipus de pluja, la mida i la velocitat de les gotes d'aigua.

## 1.4. Característiques de propagació a la interferometria SAR

A la regió de les microones i ones mil·limètriques, on la freqüència varia des de 1 GHz fins a 300 GHz, la ionosfera pot considerar-se transparent a la propagació de les ones electromagnètiques. Això és degut a que l'efecte de camp magnètic terrestre sobre els electrons és despreciable per a freqüències per damunt de 10 MHz, i la freqüència del plasma que està directament relacionada amb el fenomen de refracció/reflexió ionosfèrica també és molt menor.

El factor més important a considerar en el cas de longituds d'ona de pocs centímetres és l'atenuació produïda per la pluja i la neu, i en el cas de freqüències mil·limètriques l'atenuació produïda per la boira, vapor d'aigua i altres gasos presents a l'atmosfera.

L'atenuació és la pèrdua de potència del feix de la radiació electromagnètica emesa pel radar al travessar el medi pel que viatja i afecta tant al camí d'anada com de tornada. Els fenòmens físics implicats en el procés de l'atenuació són l'absorció de part de l'energia incident i la dispersió d'aquesta energia.

### 1.4.1. Influència de la pluja

Les ones de ràdio que es propaguen a través d'una regió de pluja s'atenuen com a conseqüència de l'absorció de potència que es produeix en un medi dielèctric amb pèrdues com és l'aigua. Addicionalment, també es produeixen pèrdues a la ona transmesa degut a la dispersió de part de l'energia del feix que provoquen les gotes de la pluja. No obstant, l'atenuació per dispersió és generalment reduïda en comparació amb les pèrdues per absorció.

Des d'un punt de vista d'enginyeria de comunicacions, a l'hora de dissenyar un radioenllaç, existeix una fórmula que relaciona l'atenuació específica amb paràmetres com la taxa de pluja, la freqüència o la temperatura:

$$A(\text{dB} / \text{km}) = a \cdot R^b \quad (1.11)$$

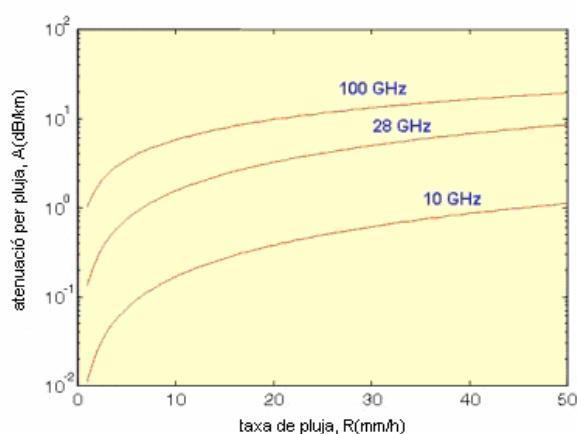
on:

$R$ , és la taxa de pluja en mm/h,

$a$  i  $b$ , són constants depenents de la freqüència i temperatura de la pluja.

La dependència amb la temperatura es deu a la variació de la constant dielèctrica de l'aigua amb la temperatura. Els valors exactes de les constants  $a$  i  $b$  han sigut obtinguts per Olsen, Rodgers i Hodge, els quals han establert fórmules empíriques per a una temperatura de  $0^{\circ}\text{C}$  a partir de dades experimentals. A la següent figura es representen els resultats d'atenuació específica per pluja per a diferents freqüències i en funció de la taxa de pluja utilitzant aquestes fórmules empíriques.

S'observa que l'atenuació creix amb  $R$  i és més forta per a freqüències superiors. Les pèrdues per pluja són sensibles a la polarització del senyal transmès, sent més grans en el cas de polaritzacions horitzontals (l'ERS-SAR opera a la banda C amb polarització vertical). Això es deu a la forma adoptada per les gotes de pluja al caure. Donat que les gotes de pluja es troben en moviment, el senyal rebut fluctua en el temps i presenta un soroll característic a tenir en compte.



**Fig. 1.7** Atenuació per pluja en funció de la taxa de pluja

#### 1.4.2. Influència dels núvols

A la següent taula es pot veure el contingut d'aigua líquida dels núvols:

Tipus de núvol	Contingut d'aigua líquida [ $\text{g}/\text{m}^3$ ]	Retard zenital [ $\text{mm}/\text{km}$ ]
Núvols estratiformes	0,05-0,25	0,1-0,4
Núvols cumulus petits	0,5	0,7
Cumulus congestus i cumulonimbus	0,5-2	0,7-3
Núvols de gel	<0,1	<0,1

**Taula 1.1.** Classificació dels diferents tipus de núvols

El màxim contingut d'aigua es troba a uns 2km per sobre del núvol base. Encara que la permetivitat de l'aigua és una funció de la temperatura, és possible aproximar-la a l'equació:

$$N_{\text{núvol}} = \frac{3}{2} \frac{W}{\rho_w} \frac{\epsilon_0 - 1}{\epsilon_0 + 2} = 1,45W \quad (1.12)$$

on:

$W$  és el contingut d'aigua líquida,

$\rho_w$

$\epsilon_0$

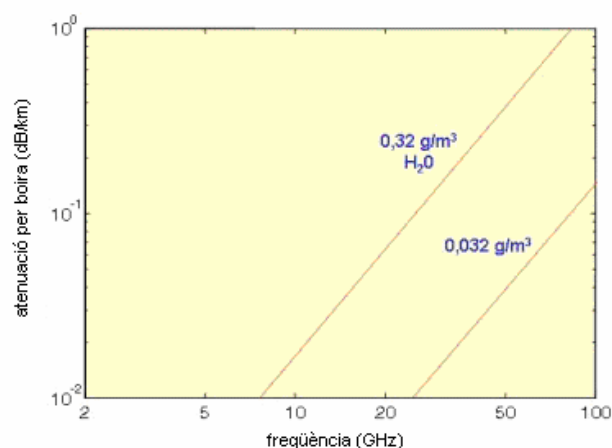
D'aquesta manera, és pot determinar el retard en distància addicional  $\Delta R_{e,\text{núvol}}$  causat pel líquid d'aigua als núvols:

$$\Delta R_{e,\text{núvol}} = \frac{1,45}{\cos \theta} W \quad [mm / km] \quad (1.13)$$

### 1.4.3. Influència de la boira

L'atenuació per la boira a les microones i les ones mil·limètriques és semblant al cas de la pluja. La principal diferència és que la boira pot modelar-se com a un conjunt de gotes d'aigua molt petites en suspensió amb radis variables entre 0,01 i 0,05 mm. Per a freqüències per sota de 300 GHz l'atenuació produïda per la boira és linealment proporcional al contingut total d'aigua per unitat de volum per a cada freqüència.

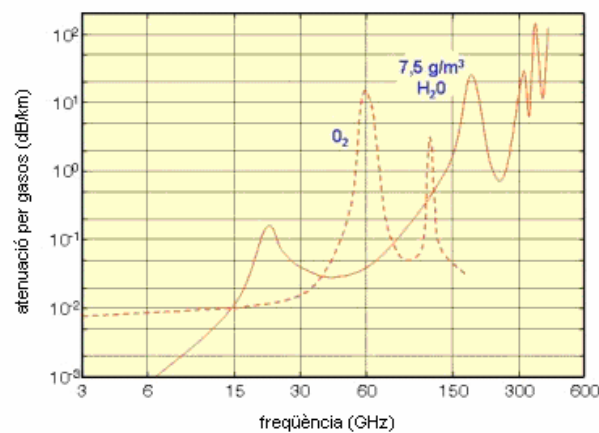
A la figura següent es representa l'atenuació per boira en  $dB/km$  en funció de la freqüència i per a dues concentracions diferents (concentració densa de  $0,32 \text{ g/m}^3$  i concentració menys densa de  $0,032 \text{ g/m}^3$ ).



**Fig. 1.8** Atenuació per boira en funció de la freqüència

#### 1.4.4. Influència dels gasos atmosfèrics

Els vapors d'aigua i d'oxigen no condensats tenen línies d'absorció a la banda de freqüències de microones i d'ones mil·limètriques. Per això existeixen freqüències on es produeix una gran atenuació i freqüències on l'atenuació és molt menor. La següent figura mostra l'atenuació en dB/km produïda pels vapors d'oxigen i d'aigua a 20°C sobre el nivell del mar. El contingut de mol·lècules d'aigua és del 1%, que és típic de climes mitjos. A freqüències per damunt de 300 GHz s'observa que l'atenuació per oxigen és despreciable en comparació amb la del vapor d'aigua.



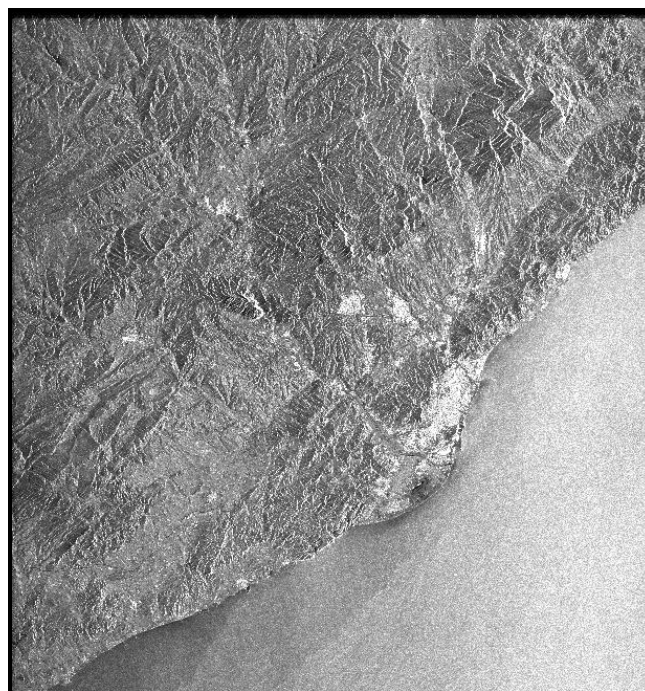
**Fig. 1.9** Atenuació per gasos en funció de la freqüència

## CAPÍTOL 2. ESTIMACIÓ DE LA COMPONENT ATMOSFÈRICA

Els efectes atmosfèrics representen un dels majors límits per a la interferometria SAR com a tècnica quantitativa per a monitorització de deformacions de terreny. Per a mitigar la degradació de qualitat causada per aquests efectes, es necessiten sovint observacions redundants, és a dir, més de dues imatges SAR. En els següents capítols es proposa un nou procediment per a reduir els efectes atmosfèrics, que pot ser eficaç amb només una parella d'imatges. Utilitzant informació disponible a priori, és possible indentificar zones estables a les zones veïnes de la deformació sota anàlisi. S'utilitzen les zones estables per a realitzar una anàlisi quantitativa dels efectes atmosfèrics d'un interferograma donat. A més, adoptant un filtre convenient i una tècnica de predicció, es pot arribar a estimar la component atmosfèrica de la fase d'InSAR i a predir-la per sobre de l'àrea de la deformació, millorant la qualitat dels mapes de deformació generats [2].

### 2.1 Zona d'observació per a l'estudi

Per a l'estimació del model atmosfèric són necessàries moltes observacions d'una mateixa zona. La zona escollida per a l'estudi és Catalunya. Del conjunt d'interferogrames de la zona, s'han seleccionat aquells amb els efectes atmosfèrics més forts sent un total de 29 observacions. Aquest grup d'interferogrames provenen d'imatges ERS1/2, adquirides entre Abril de 1995 i Juliol de 2000, sent els intervals de temps ( $\Delta t$ ) entre parelles d'imatges d'entre 35 i 1504 dies.



**Fig. 2.1** Imatge SAR de Catalunya

Els interferogrames estan formats per graelles irregulars de 618x612 píxels on cada píxel conté la informació de la fase interferomètrica diferencial (veure fórmula 1.2). Aquestes graelles es classifiquen com a irregulars perquè no tots els píxels disposen d'informació. Les dimensions de cada píxel són de 160x160m per tant els interferogrames per a l'estudi cobriran una zona de aproximadament 100x100km.

Un interferograma el conformen dues imatges radar (*master* i *slave*) adquirides en diferents instants de temps. En ell, es representa la diferència de fase entre les dues imatges i la seva visualització està formada per diferents colors. Normalment, es visualitzen amb els colors que formen l'arc de Sant Martí. Cada color es correspon a un determinat rang de valors, depenen dels valors mínims i màxims de fase. En funció d'aquests límits, que són els que marquen, respectivament, el principi i final de l'escala de colors, es conformaran els rangs de fases que es relacionaran amb la resta de colors, seguint sempre l'ordre de l'arc de Sant Martí.

Els efectes atmosfèrics són deguts a les heterogenitats de propagació de les microones, que resulten en una variació espacial de  $\Phi_{\text{Atm}}$  [fórmula (1.1)]. Considerant les àrees estables on  $\Phi_{\text{Mov}}$  és zero, és possible avaluar la influència de les heterogenitats atmosfèriques a l'interferograma amb una simple observació visual. Quan el retard atmosfèric és constant en tot l'interferograma, la variació espacial és deguda a  $\Phi_{\text{Noise}}$  i  $\Phi_{\text{Res\_Topo}}$ , que poden ser considerades decorrelades espacialment i que seran considerades com a soroll. En presència d'heterogenitats atmosfèriques,  $\Phi_{\text{Atm}}$  varia dins l'interferograma i presenta la part correlada de  $\Phi_{\text{D-Int}}$ . La contribució de  $\Phi_{\text{Atm}}$  pot ser avaluada analitzant l'autocorrelació espacial de  $\Phi_{\text{D-Int}}$ . L'anàlisi està basat en la funció empírica d'autocovariança (EAF), que té com a paràmetres característics la variació del senyal  $\sigma_s^2$  i la longitud de correlació  $L_C$ .

Per a l'anàlisi estocàstica es fa ús de tres programes, com són el *corona*, el *correl* i l'*intcor*. El *corona* proporciona l'estimació del pas òptim per a l'estimació de la funció d'autocovariança calculada pel *correl*. Un cop s'obté la EAF, l'*intcor* cerca la funció model d'autocovariança (MAF), necessària per a garantir la matriu positiva d'autocovariança de les fases en 2D en el domini espacial.

## 2.2 Interpolació espacial

La interpolació és un 'procediment matemàtic utilitzat per a predir el valor d'un atribut, a una ubicació precisa, a partir de valors de l'atribut obtinguts d'ubicacions veïnes, dins d'una mateixa regió' (Burroughs i Mc Donnell, 1998). La interpolació és necessària quan una superfície rasteritzada (grael·la) té una resolució diferent a la resolució demanada, quan una superfície contínua és representada per un model diferent al necessitat, o quan les dades no cobreixen tota la regió d'interès.

La interpolació per Geoestadística utilitza la estadística espacial, on es descriuen la correlació espacial i temporal d'un atribut. Es basa sobre el concepte de variables regionals i l'estructura espacial es calcula amb funcions d'estructura com el variograma i correlograma.

Per a comparar la qualitat dels mètodes d'interpolació entre ells, comunament es fa servir l'arrel de l'error quadràtic mig, però existeixen altres metodologies com l'anàlisi de l'estructura espacial.

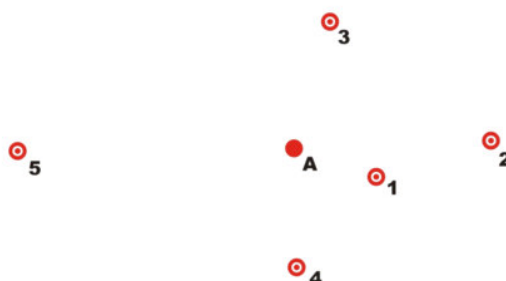
### 2.2.1 Kriging

El *kriging* és un procediment d'interpolació que utilitza el variograma (expressió de la variació espacial) per a predir valors desconeguts de variables distribuïdes espacialment a partir de dades observades a llocs coneguts.

El *kriging* és, per tant, el mètode de càlcul d'una variable regional a un punt, a l'interior d'una superfície o dins d'un volum, usant un criteri de minimització de l'estimació de la varianza. Aquest mètode resol un conjunt d'equacions utilitzant la informació present al variograma i les distàncies relatives entre les dades i les posicions del punt que es vol interpolar. Aquestes equacions contenen la covariança entre el punt a estimar i les dades i les covariances entre les dades mateixes. És un mètode d'interpolació exacte, en el sentit que la seva estimació a un punt de control coincideix amb el valor observat.

El procediment és similar al usat amb el mètode de pes proporcional a la distància en una finestra que defineix la regió d'influència, però on els pesos són derivats a partir d'un anàlisi geoestadístic. Quantitativament, el *kriging* consisteix en la predicció del valor de la variable.

Es considera el següent problema on es tenen punts de mostreig amb els seus respectius valors i es vol estimar el valor del punt A:



**Fig. 2.2** Diferents punts de mostreig al voltant del punt d'interès A.

Hi ha diferents possibilitats. Es pot començar decidint que el punt 1 tindrà 'més influència' que el punt 5, però sorgeix un problema de ponderació i mètodes

clàssics d'interpolació (inversos de la distància, mètode Shepard, mètode de polígons, etc.).

L'estimació mitjançant el mètode Shepard es calcula a partir de la funció següent:

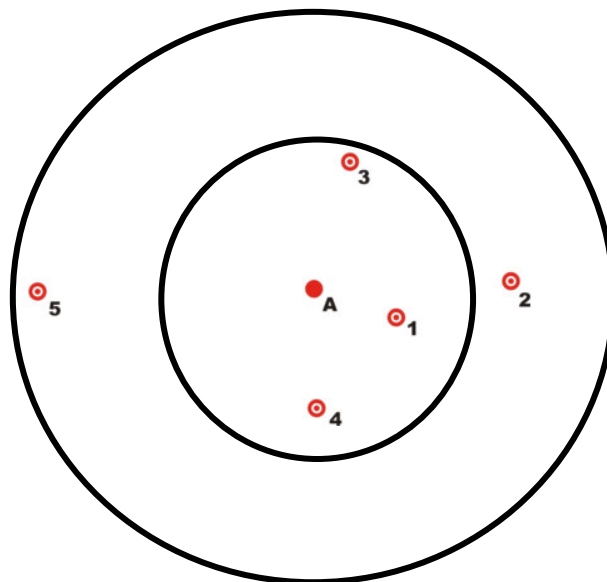
$$w(d) = \frac{1}{d^p} \quad (2.1)$$

on:

$d$ , és el radi del veïnat, i

$p$ , és la potència assignada per a cada cas.

Es defineixen dos veïnats diferents al voltant del punt a estimar, per tal de diferenciar els pesos segons la distància a la que es troben els punts de dades del punt d'interès. Dins l'interior del veïnat s'assigna una potència de 2, i a l'exterior una potència de 4.



**Fig. 2.3** Estimació mitjançant el mètode Shepard

En aquest exemple l'estimació no està essent la millor possible, ja que la distància entre el punt A i el punt 1 no és la mateixa que entre el punt A i el punt 3, però se'ls hi dóna la mateixa ponderació. El mateix passa gran fora del veïnat, on la distància entre el punt A i el punt 2 no és la mateixa que entre punt A i el punt 5. És ara quan, es remet als mètodes geoestadístics, en particular al variograma, l'eina bàsica del *kriging*.

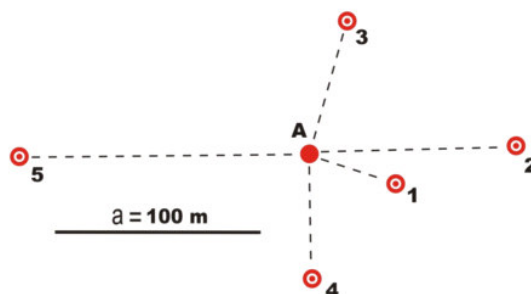
Existeixen dues raons principals per a utilitzar el variograma:

1. el variograma dóna una mida del '*range*' de les mostres, ja que diu fins a quin punt de l'espai els valors són significatius



2. el variograma dóna també una idea de la variabilitat dels valors a l'espai, això vol dir, que si el sistema és fortament anisotròpic, les mostres poden tenir una millor correlació en una direcció que en una altra: el 'range' dependrà de la direcció.

Tornant a l'exemple anterior i introduint les distàncies entre els punts:



**Fig. 2.4** Determinació de les distàncies entre punts

Es necessita un variograma per a determinar quines mostres poden tenir una influència 'real' a l'estimació del punt A, en aquest cas, ja que el 'range' dóna una idea de fins a quina distància existeix una relació entre les mostres. Per exemple, si el 'range' determinat per la modelització del variograma fos de  $a=100\text{m}$ , la mostra 5 tindria que ser descartada perquè es troba a una distància superior a  $100\text{m}$  del punt A ( $134\text{m}$ ).

#### 2.1.1.1 Variograma

Dos conjunts d'imatges poden ser 'estadísticament equivalents' i tenir una distribució espacial XY dels valors substancialment diferents a cada cas.

La solució a com es pot relacionar els valors amb les seves posicions a l'espai i, el que és més important encara, a com relacionar aquests valors entre si és el requisit bàsic per a poder interpolat dades i obtenir una informació gràfica sobre les tendències mostrades per les variables: *kriging*.

Això es pot obtenir mitjançant l'eina més bàsica de la geoestadística, el variograma, una funció matemàtica que permet estudiar les diferències entre mostres i la direccionalitat (anisotropia) dels valors.

Si la distància  $h$  entre dues mostres és igual a 0, la diferència entre els valors d'aquestes serà nul·la i la varianza també. Si ambdues mostres estan molt a prop, existirà una diferència, però la varianza serà molt petita. No obstant, a mida que les mostres estan més allunyades, arribarà un moment en el qual deixi d'haver una 'relació' entre les mostres i es podrà determinar mitjançant una construcció matemàtica d'un variograma experimental i la seva posterior modelització.

Es defineix el variograma com la mitja dels quadrats de les diferències entre parells de mostres separades una distància  $h$ :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (2.2)$$

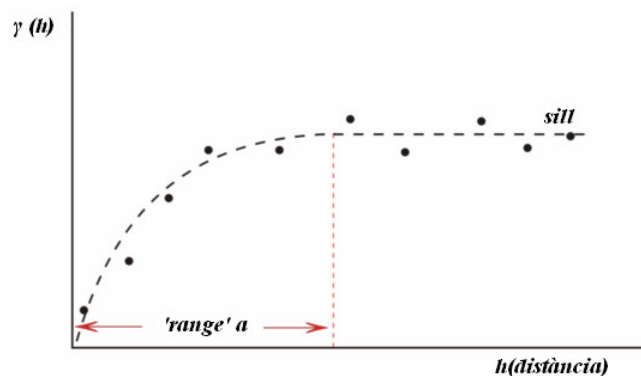
on:

$h$ , és la distància entre parells de mostres

$n$ , és el nombre de parelles

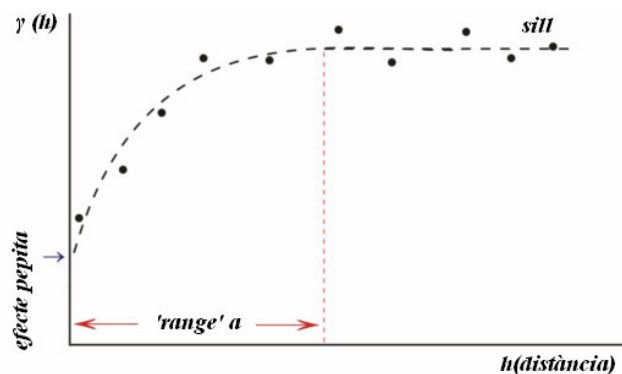
$Z(x_i)$ , és la localització i valor de la mostra

Exemple clàssic d'un variograma experimental ajustat al 'model esfèric'. La variància creix sistemàticament fins a ' $a$ ' ('range'), distància a partir de la qual les mostres comencen a ser independents unes de les altres. El 'sill' mostra la zona de la corba on els valors ja no es correlacionen.



**Fig. 2.5** Variograma ajustat al 'model esfèric'

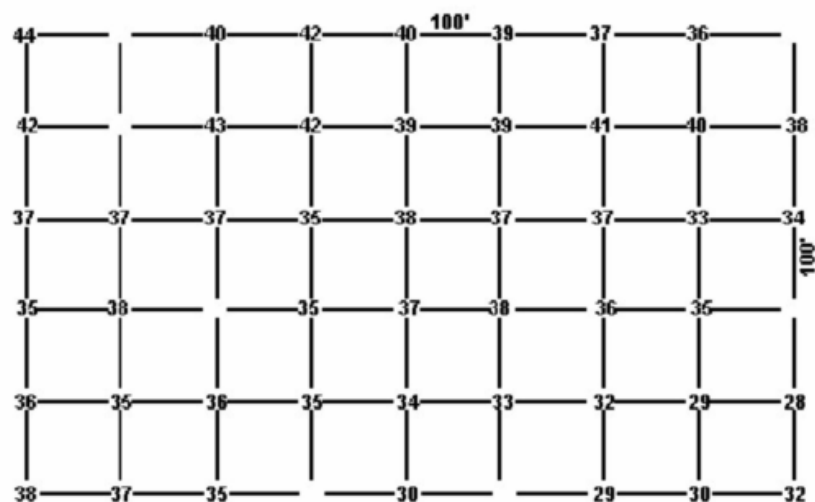
A diferència del cas anterior, on la corba comença a l'origen del sistema XY (variança 0), aquí s'observa l'anomenat 'efecte pepita' ('nugget'), el qual es deu a fluctuacions aleatòries de la variable o a errors en el mostreig.



**Fig. 2.6** Efecte pepita ('nugget effect')

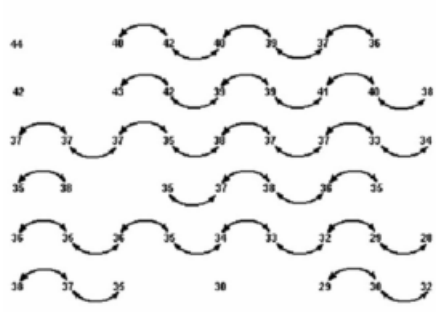
Per a construir un variograma experimental es proposa a l'obra clàssica '*Practical Geostatistics*' (1979) d'Isobel Clark el següent exemple:

Se suposa una malla quadrada on s'han pres una sèrie de mostres amb determinats valors i la distància entre mostres és de 100'.



**Fig. 2.7** Malla quadrada d'Isobel Clark

El primer punt de la funció  $\gamma(h)$  vindrà donat per  $\gamma(100)$ , que és la mitja dels quadrats de les diferències entre totes les parelles de mostres separades per una distància de 100':

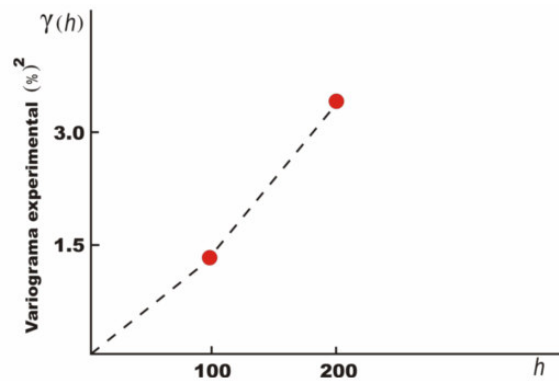


$$\gamma^*(100) = \frac{\begin{aligned} &[(40-42)^2 + (42-40)^2 + (40-39)^2 + (39-37)^2 \\ &+ (37-36)^2 + (43-42)^2 + (42-39)^2 + (39-39)^2 \\ &+ (39-41)^2 + (41-40)^2 + (40-38)^2 + (37-37)^2 \\ &+ (37-37)^2 + (37-35)^2 + (35-38)^2 + (38-37)^2 \\ &+ (37-37)^2 + (37-33)^2 + (33-34)^2 + (35-38)^2 \\ &+ (35-37)^2 + (37-36)^2 + (36-36)^2 + (36-35)^2 \\ &+ (36-35)^2 + (35-36)^2 + (36-35)^2 + (35-34)^2 \\ &+ (34-33)^2 + (33-32)^2 + (32-29)^2 + (29-28)^2 \\ &+ (38-37)^2 + (37-35)^2 + (29-30)^2 \\ &+ (30-32)^2 \end{aligned}}{(2 \times 36)} = 1.46(\%)^2$$

**Fig. 2.8** Càlcul de la mitja dels quadrats de les diferències de parelles de mostres separades per una distància de 100'

D'aquesta manera s'obté el primer punt per a la construcció del variograma experimental, on a l'eix Y ( $\gamma(h)$ ) es té un valor de 1.46 i a l'eix X ( $h$ ) un altre de 100. Per a aconseguir el segon punt  $\gamma(200)$  es fa el mateix i així successivament.

Aquests punts apareixeran al variograma experimental de la següent manera:



**Fig. 2.9** Exemple de construcció del variograma experimental

Es repeteixen els càlculs fins a  $\gamma(300)$ ,  $\gamma(400)$ ,  $\gamma(500)$ , etc. Es podria continuar d'aquesta manera fins a 800', que és la màxima distància mostrejada, però en general es realitzen els càlculs fins a la meitat, que és 400'.

### 2.3 Funció empírica d'autocovariança (EAF)

La funció empírica d'autocovariança dona el grau de correlació d'una variable amb ella mateixa quan les observacions són considerades amb una diferència en temps (autocorrelació temporal) o en l'espai (autocorrelació espacial). Aquestes mesures són relacions entre la covariança mesurada per un pas donat i la variança total. La funció d'autocovariança resulta de gran utilitat per trobar patrons repetitius dins d'una imatge, com per exemple, trobar la component atmosfèrica en una àrea determinada. La funció d'autocovariança espacial  $C(d_k)$  relaciona la component atmosfèrica dels píxels en funció de la distància que presenten entre sí.

$$C(d_k) = \frac{1}{n_T} \cdot \sum_{i=1}^{n_T} \left\{ [M(P_i) - m_M] \cdot \frac{1}{n_J} \cdot \sum_{j=1}^{n_J} [M(P_j) - m_M] \right\} \quad (2.3)$$

on:

$d_k = K \cdot \Delta$ , és la distància des de l'origen;

$\Delta$ , és el pas de la funció;

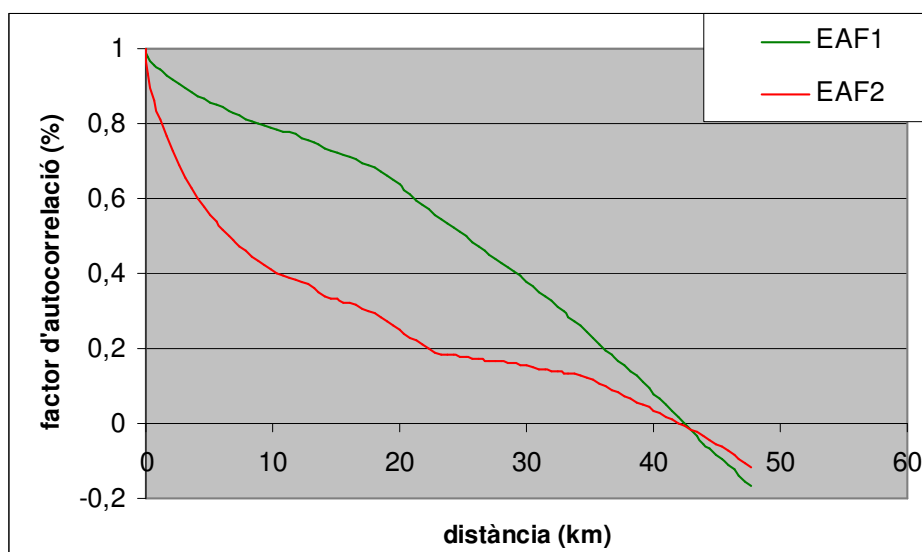
$n_T = l \cdot m$ , és el nombre total de píxels de la imatge;

$M(P_i)$ , és el valor de la imatge al píxel  $P_i$ ;

$m_M$ , és el valor mig de la imatge, i

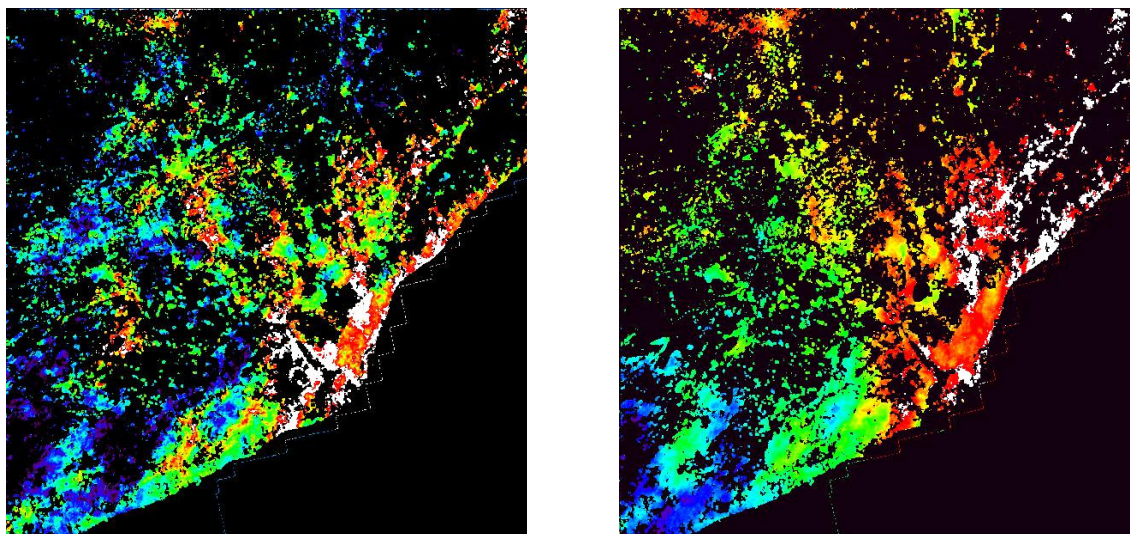
$n_J$ , és el nombre total de píxels  $P_j$ .

En el següent exemple es mostren dues funcions d'autocovariança de dos interferogrames. El factor d'autocorrelació dóna el grau de correlació entre els valors dels píxels d'una mateixa imatge en funció de la distància que hi ha entre ells, per tant, quan més gran sigui el factor d'autocorrelació en funció de la distància, més relació tindran els propis píxels de la imatge en un radi extens, traduint-se en una forta correlació espacial. D'altra banda, que el grau de correlació decreixi més ràpidament en funció de la distància, no implica que no hi hagi correlació entre les dades de la imatge, perquè la correlació existeix, però la relació entre elles no es dóna en un radi tan ampli i es pot dir que la correlació és fluixa.



**Fig. 2.10** Exemple de dues EAF, representant els interferogrames de la figura següent (Fig. 2.11).

Abans de saber a quines imatges pertanyen les funcions anteriors, es podria deduir que la EAF que dóna el grau de correlació més elevat (a la gràfica, de color verd) seria la corresponent a una imatge uniforme, ja que la relació entre els píxels és elevada (per sobre del 50%) fins a un radi de 27 km. En canvi, la relació entre els píxels de la EAF amb un grau de correlació baix (a la gràfica, de color vermell) arriba fins a una distància de només 7 km.



**Fig. 2.11** A l'esquerra, interferograma corresponent a la EAF2. A la dreta, interferograma corresponent a la EAF1.

Existeix una gran diferència entre les dues imatges, en les quals la distribució dels valors dels píxels és progressiva a tot l'interferograma de la dreta, mentre que al de l'esquerra la progressió es dona en zones locals, és a dir, que no hi ha una relació general entre els píxels a tota la imatge.

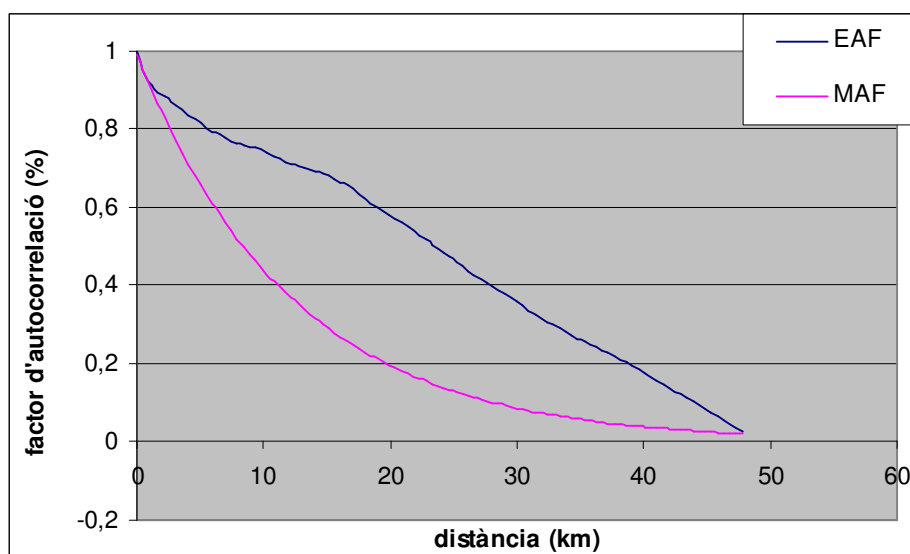
Com s'ha explicat anteriorment (1.2.1), l'atmosfera no presenta un comportament homogeni a tota la imatge, però presenta la part correlada de l'interferograma. Observant les imatges de l'exemple, la diferència més significativa és la distribució de les respectives fases. A l'interferograma de la dreta, hi ha un terme linial destacat, causat per un error en el càlcul de l'òrbita precisa, que es propaga a tot l'interferograma de forma linial (Fig. 2.12). Aquest error impedeix que es visualitzi l'atmosfera, si n'hi ha. En canvi, a l'interferograma de l'esquerra, no existeix cap terme linial i es veu la component atmosfèrica.

## 2.4 Model de la funció d'autocovariança (MAF)

El model de la funció d'autocovariança es podria definir com la representació o descripció del conjunt de relacions de les dades empíriques. Aquests models són sempre una aproximació i descriuen diferents funcions teòriques, com per exemple:

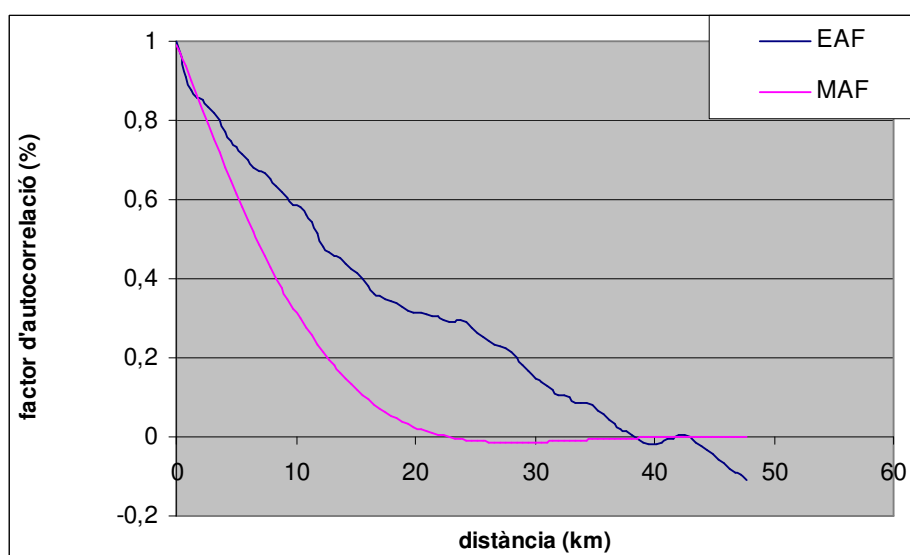
- funció exponencial
- funció normal
- funció paràbola exponencial
- funció paràbola normal
- altres variants de la funció exponencial
- altres variants de la funció normal

Del conjunt d'interferogrames utilitzats per a l'estudi, un 5% s'ha modelitzat amb una funció exponencial, un altre 5% amb una variant d'exponencial i el 90% amb una funció paràbola exponencial.



**Fig. 2.12** Exemple de MAF amb funció exponencial.

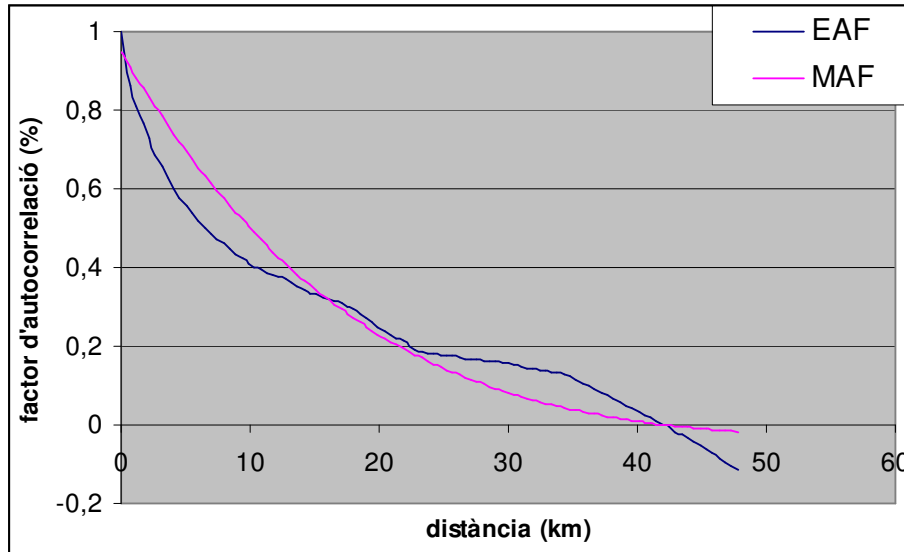
La modelització en aquest exemple no funciona. El factor d'autocorrelació entre la EAF i la MAF difereix en un valor mínim de un 10% i d'un màxim d'un 40%, tenint la MAF sempre els valors mínims. El model teòric de la funció d'autocovariança no s'ajusta als paràmetres empírics.



**Fig. 2.13** Exemple de MAF amb variant de funció exponencial.

Aquesta modelització és més exacta a distàncies curtes, ja que a una distància de menys de 10km la diferència del factor d'autocorrelació entre la EAF i la

MAF no supera el 10%. A partir de distàncies de 20km aquesta diferència és duplica.



**Fig. 2.14** Exemple de MAF amb funció paràbola exponencial.

La modelització que sofreixen gairebé tots els interferogrames observats és la de paràbola exponencial. Resulta ser el model teòric que millor s'ajusta als valors empírics, apropant-se sempre els valors de la MAF als de la EAF. La diferència no supera el 10% en cap cas.

## 2.5 Espectre de Kolmogorov

Les turbulències atmosfèriques provoquen fluctuacions a l'índex de refractivitat, causant fluctuacions a la fase interferomètrica SAR. Aquests efectes de turbulència es poden modelar segons la llei de potència (*power-law*) de Kolmogorov.

A la teoria de Kolmogorov, el comportament dinàmic de les fluctuacions de l'índex de refracció s'utilitza per a predir les propietats de les distorsions de la fase introduïdes en un medi de propagació d'ona a través de turbulència. Segons aquesta teoria, les fluctuacions de l'índex de refracció només poden comportar-se d'una única forma, és a dir, segons la potència de la turbulència ( $C_N^2$ ) [3].

Assumint que la funció d'estructura de turbulència és [4]:

$$D_{\Delta \text{Re}}(s) = E\{(\Delta \text{Re}(x) - \Delta \text{Re}(x+s))^2\} \quad (2.4)$$



on:

$\Delta Re(x)$ , és l'error en distància al punt  $x$ ;  
 $s$ , és la separació entre els punts, i  
 $E$ , és la esperança de la funció  $\Delta Re(x)$ ;

i mentre la separació  $s$  es trobi dins els límits de la turbulència isotròpica, la teoria de Kolmogorov prediu [5]:

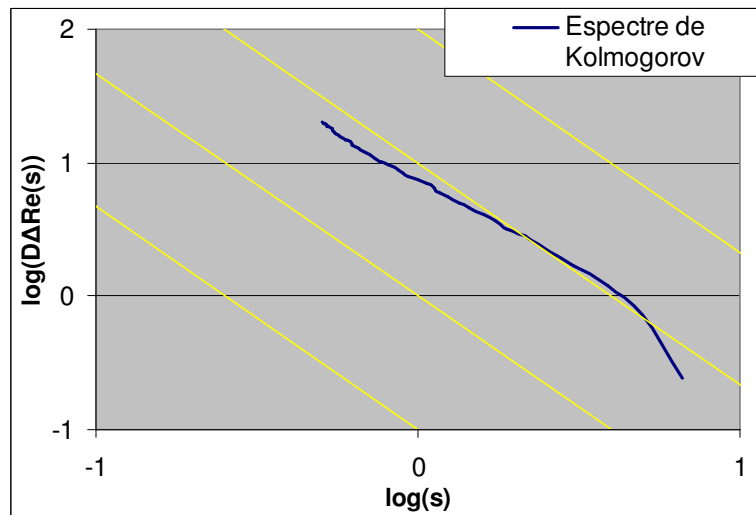
$$D_N(s) = C_{\Delta Re} s^{\frac{5}{3}} \quad (2.5)$$

on el factor  $5/3$  arriba a 0 quan  $s$  es troba fora dels límits de la turbulència.

Representant doncs, l'espectre de potència de la funció d'autocovariància de la imatge en escala logarítmica (log/log):

$$\log(D_{\Delta Re}(s)) = \frac{5}{3} \log(s) + \log(C_{\Delta Re}) \quad (2.6)$$

s'observa com la densitat espectral segueix la tendència  $-5/3$  corresponent a una estructura de turbulència.



**Fig. 2.15** Densitat espectral representada en escala log/log d'un interferograma amb estructura de turbulència.

L'interferograma corresponent a l'espectre de Kolmogorov presentat a la figura de dalt, presenta una estructura de turbulència, ja que la tendència de la

densitat espectral dibuixada en escala logarítmica segueix el comportament de  $-5/3$  descrit per la fórmula 2.6.

## 2.6 Anàlisi i interpretació del resultats

L'objectiu per a la mesura i anàlisi de les deformacions de terreny, és la component de moviment  $\Phi_{Mov}$  de la fase interferomètrica diferencial  $\Phi_{D-Int}$  (veure fórmula 1.2). El cas ideal seria que la fase  $\Phi_{D-Int}$  només tingués aquesta component de moviment.

$$\Delta\Phi_{D-Int} = \Delta\Phi_{Int} - \Phi_{Topo\_MNT} = \Phi_{Mov} \quad (2.7)$$

Malhauradament no hi ha un cas ideal, sino que el cas real conté errors d'ambigüitat de fase provocats pels residus de la component topogràfica, per la component atmosfèrica i pel soroll, com errors de processat.

$$ERROR = \Phi_{Res\_Topo} + \Phi_{Atm} + \Phi_{Noise} \quad (2.8)$$

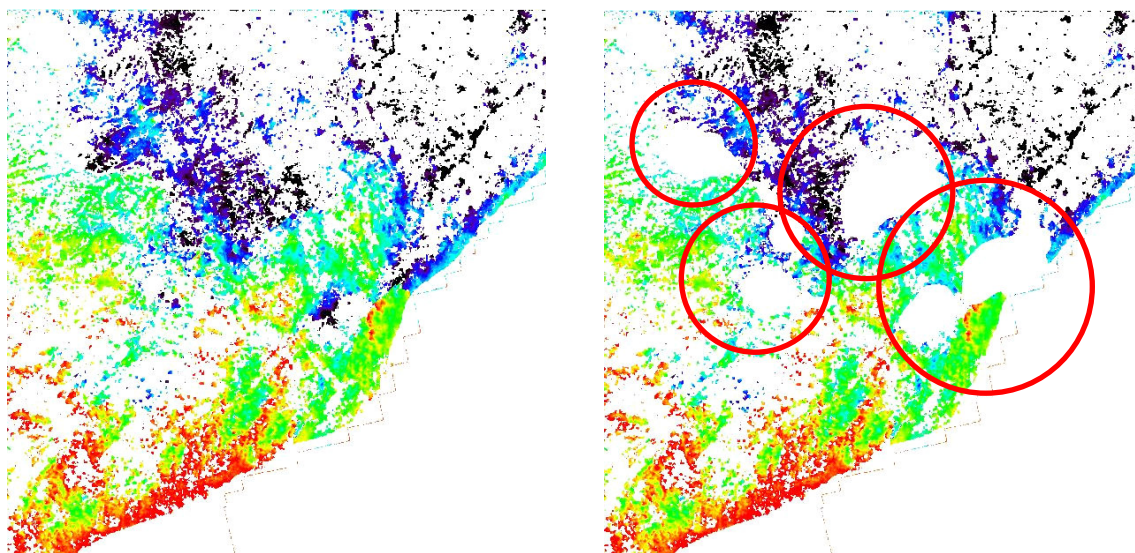
De les components que provoquen errors a l'hora de extreure el moviment de la fase interferomètrica diferencial, només la component atmosfèrica presenta unes característiques d'autocorrelació que permetran poder estimar el seu comportament en un interferograma. El moviment en un interferograma també mostra correlació espacial, per tant la part correlada d'un interferograma està formada per aquestes dues components:

$$CORRELACIÓ = \Phi_{Mov} + \Phi_{Atmo} \quad (2.9)$$

L'objectiu d'aquest projecte és estimar la component atmosfèrica, per a poder disminuir l'error a l'hora de monitoritzar deformacions de terreny, a partir del càlcul de la funció d'autocorrelació que servirà per a predir l'extensió de l'error a tota la imatge. En aquest cas, la component de moviment no és útil per a l'anàlisi i abans de realitzar el càlcul de la EAF i la MAF, serà necessària l'extracció de les zones que contenen moviments, que són zones conegudes a priori per l'Institut de Geomàtica. També en alguns exemples, serà necessària la neteja d'errors apreciables i coneguts, com poden ser errors de processat.

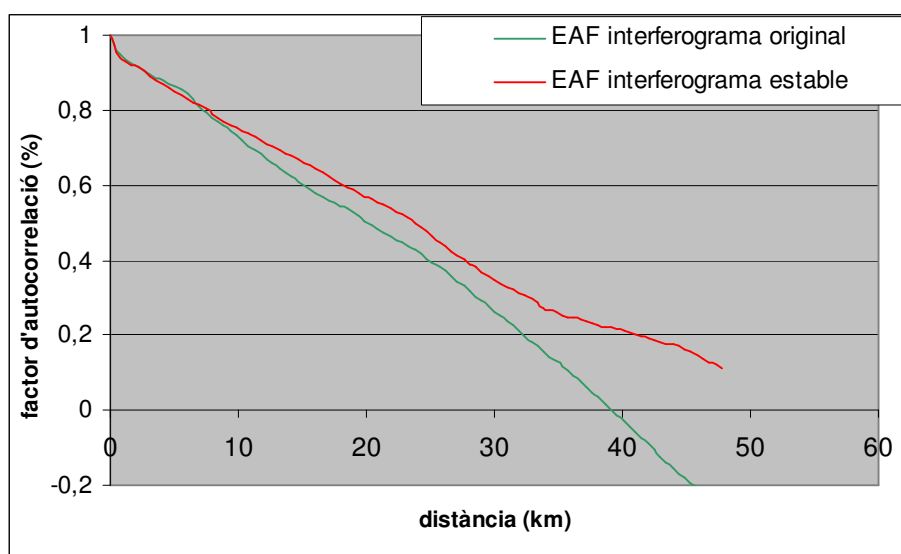
En el següent exemple es presenta un interferograma amb una distribució dels valors dels píxels ( $\Phi_{D-Int}$ ) linial a tota la imatge. Aquesta imatge conté zones de soroll provocat per un error de processat previ. Abans de començar els càlculs estadístics de correlació de la component atmosfèrica, s'hauran d'eliminar les zones que provocaran errors a l'estudi, centrat en el comportament atmosfèric.

A l'observació visual, pràcticament no s'apreciaran moltes diferències, però estadísticament el grau de correlació de la imatge millorarà amb més o menys proporció depenent de la influència de les zones amb soroll que provoquen una decorrelació espacial.



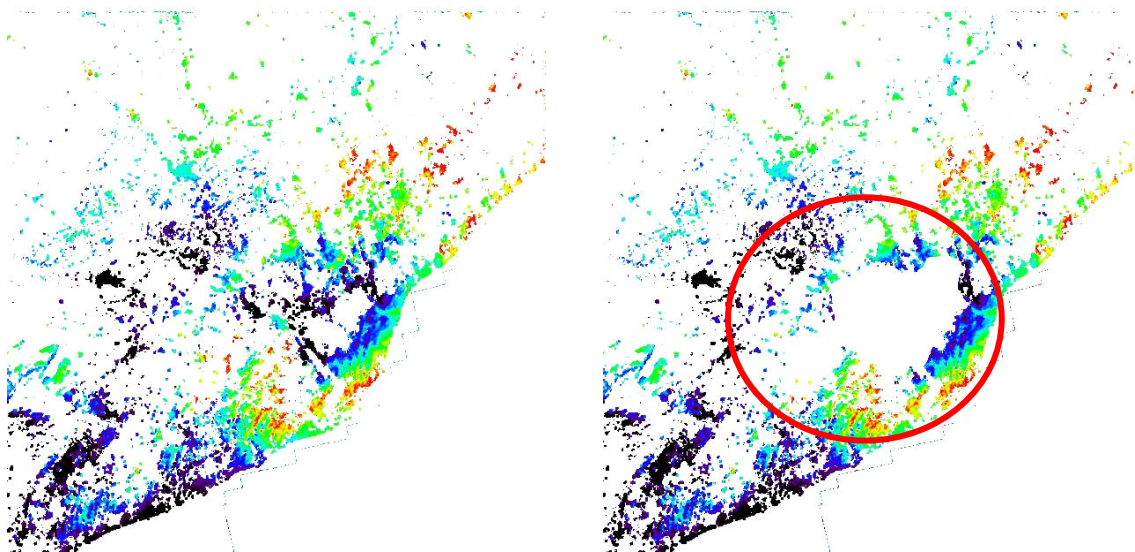
**Fig. 2.16** A l'esquerra, interferograma original. A la dreta, interferograma sense moviment.

Les EAF següents mostren la diferència entre les dues imatges anteriors. El grau de correlació del senyal original respecte del senyal estable és menor, degut a les zones de soroll.



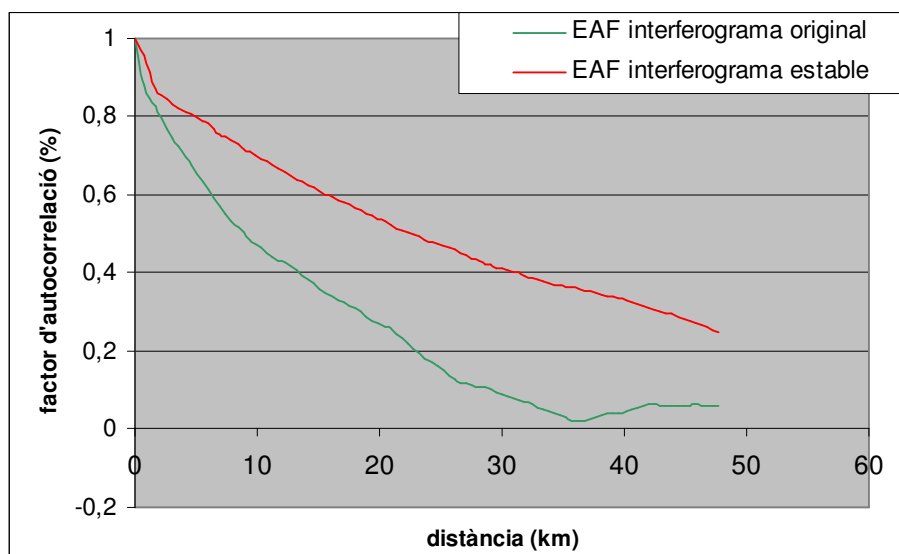
**Fig. 2.17** Funcions d'autocovariança dels interferogrames de la Fig. 2.16.

En aquest altre exemple, l'interferograma original també mostra un terme linial diferenciat, però conté una gran zona de soroll, causada per l'error de processat, esmentat anteriorment.



**Fig. 2.18** A l'esquerra, interferograma original. A la dreta, interferograma sense moviment.

Aquest error de processat causa una decorrelació important a la imatge. Estadísticament, provoca una forta desviació de la tendència de la funció d'autocovariància a l'interferograma original respecte de l'interferograma estable.

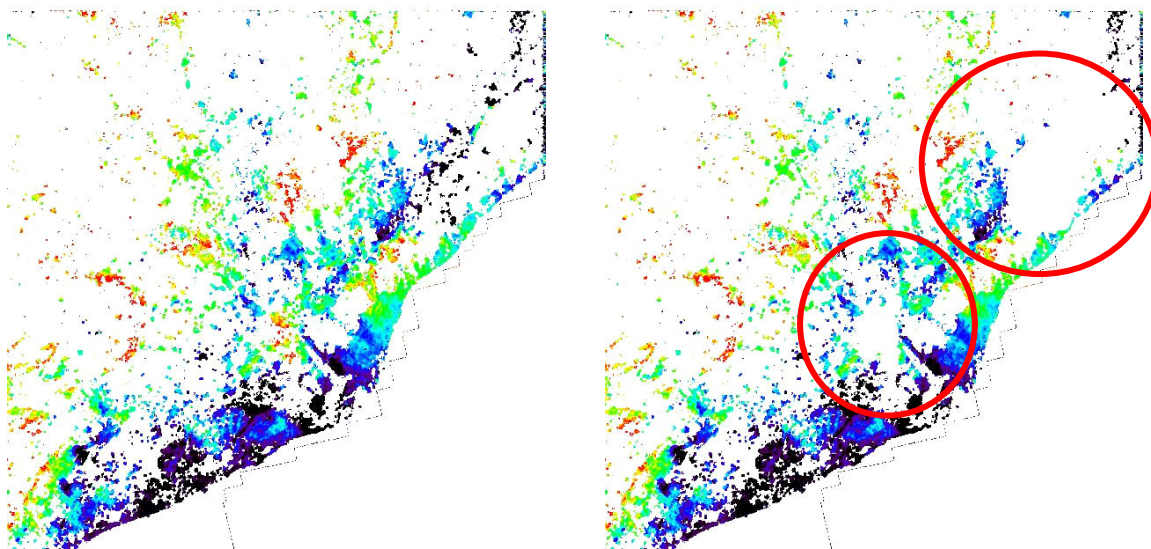


**Fig. 2.19** Funcions d'autocovariància dels interferogrames de la Fig. 2.18.

Comparant l'interferograma de la figura 2.16 amb el de la figura 2.18, s'observa com les dades són més abundants al primer que al segon. Això és degut a la diferència de temps entre les respectives adquisicions (*master* i *slave*) que conformen cadascun dels interferogrames. Al primer exemple, la diferència de temps  $\Delta t$  és de 105 dies, mentre que al segon exemple el  $\Delta t$  és de 841 dies. Aquesta diferència de temps provoca, a més, una disminució del grau de correlació en funció de la distància, ja que quant més temps passa entre adquisicions, més canvis es produeixen, i per tant més es diferencien la imatge *master* i la *slave*.

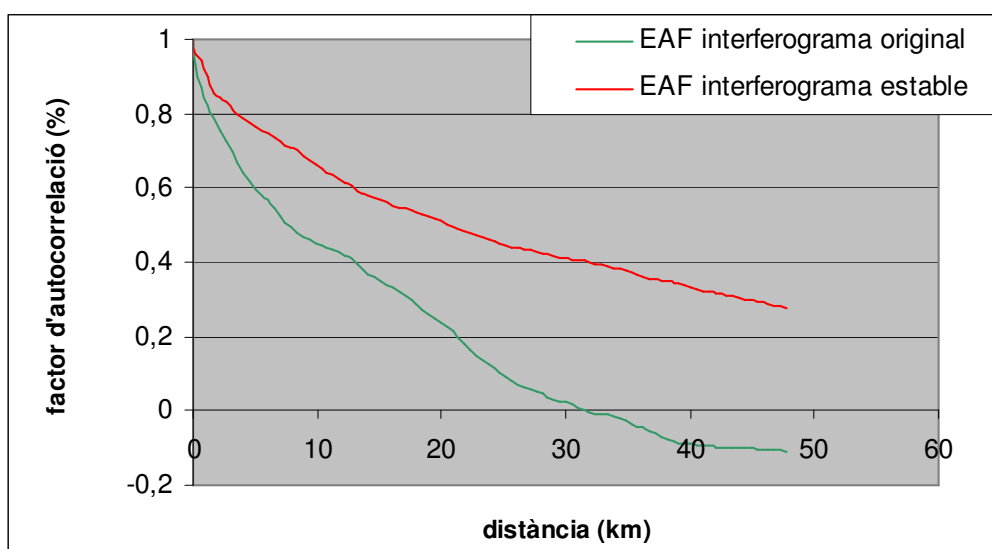
El següent exemple és un interferograma amb un  $\Delta t$  de 771 dies que presenta també un terme linial clar i errors de processat. Les característiques són molt semblants a l'interferograma de l'exemple anterior i mostra els mateixos resultats.

El primer pas és treure les zones on hi ha errors de processat i les zones amb moviment conegudes. Un cop extretes, l'interferograma només està format per la component atmosfèrica i es procedeix a l'observació estadística, mitjançant el càlcul de l'autocovariança. L'error de processat fa disminuir el grau de correlació de la EAF.



**Fig. 2.20** A l'esquerra, interferograma original. A la dreta, interferograma sense moviment.

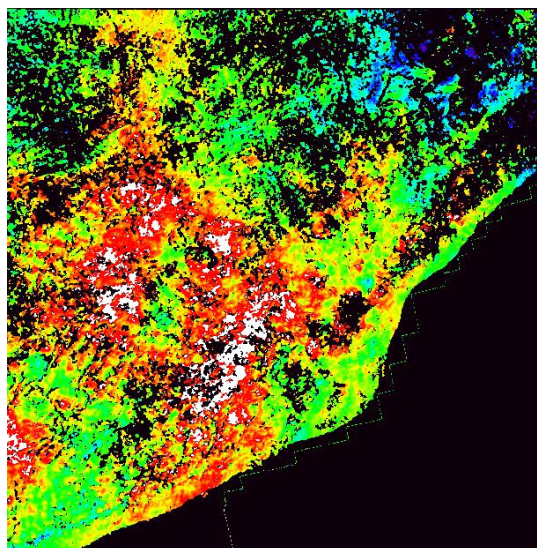




**Fig. 2.21** Funcions d'autocovariància dels interferogrames de la Fig. 2.20.

Tots els exemples anteriors mostren un terme linial produït per l'error en el càlcul de l'òrbita precisa. En els següents exemples s'analitzaran altres interferogrames on no hi ha terme linial.

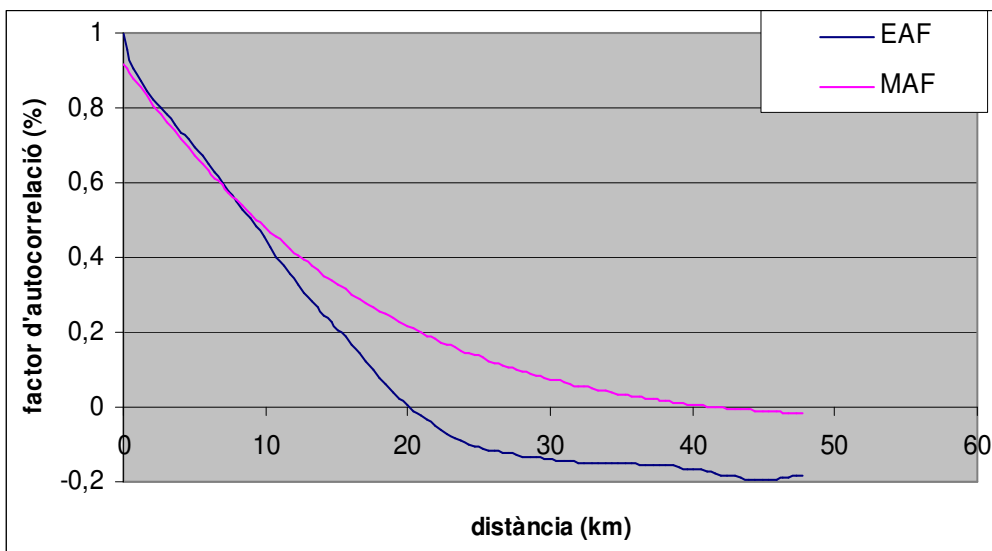
El següent interferograma mostra una atmosfera dominant. Aquest interferograma, no presenta errors de processat ni zones de moviment, per tant, no és necessària l'eliminació de cap dada que pugui ser errònia per a la continuació de l'estudi.



**Fig. 2.22** Interferograma amb atmosfera dominant.

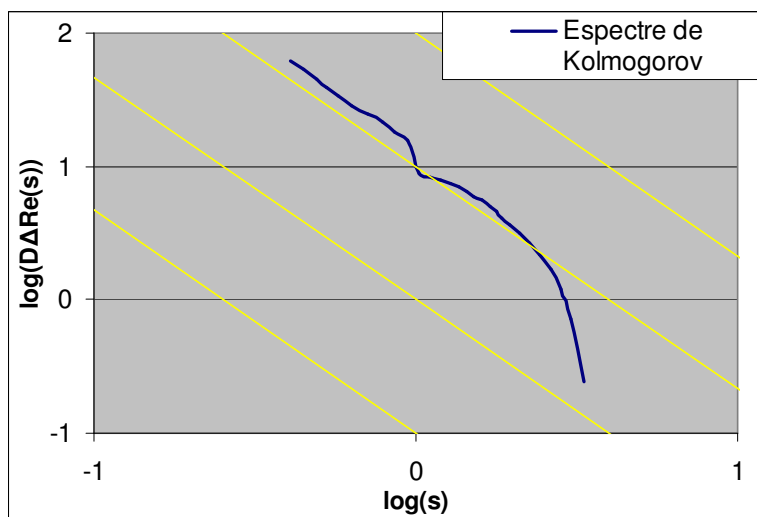
La correlació de les dades es dona en zones localitzades i no en el conjunt de tota la imatge com succeeix en imatges amb terme linial. A partir d'un radi d'aproximadament 10km les dades no estan relacionades entre si, sent el factor d'autocorrelació del 50%.

En aquest cas, el model de la funció empírica d'autocovariança és una paràbola exponencial. Aquesta funció model descriu de forma aproximada el comportament del conjunt de dades de l'interferograma.



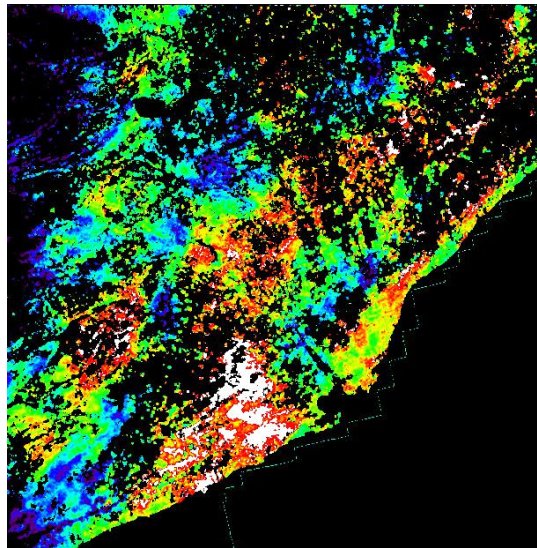
**Fig. 2.23** EAF i MAF de la Fig. 2.22.

L'espectre de Kolmogorov presenta la tendència  $-5/3$  de l'estructura de turbulència presentada a l'apartat 2.5.



**Fig. 2.24** Espectre de Kolmogorov de la Fig. 2.22.

El  $\Delta t$  que presenta aquesta imatge és de 140 dies, sent superior al de la imatge anterior, amb un  $\Delta t$  de 35 dies. Les dades són més escasses a la imatge amb la diferència de temps major, ja que, com s'ha comentat anteriorment, quant més diferència de temps hi ha entre adquisicions més canvis sofreixen els observables, produint no només una lleu disminució del grau de correlació entre les fases interferomètriques, sinó una pèrdua de informació força important.

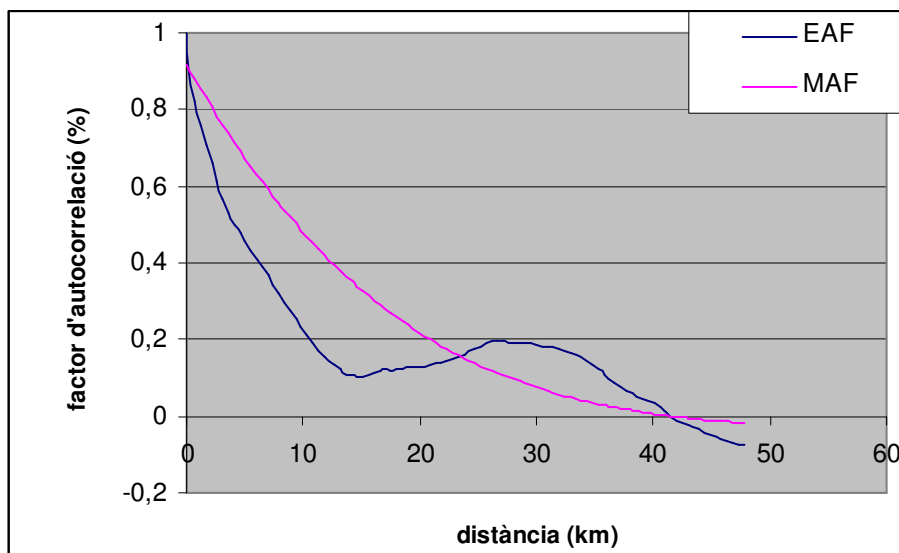


**Fig. 2.25** Interferograma amb atmosfera dominant.

La component atmosfèrica s'extén al llarg de tota la imatge, però presentant un grau de correlació no molt elevat (per sota del 50%) a distàncies superiors a 10km. L'atmosfera es dóna a zones focalitzades, amb radis no més grans de 10km.

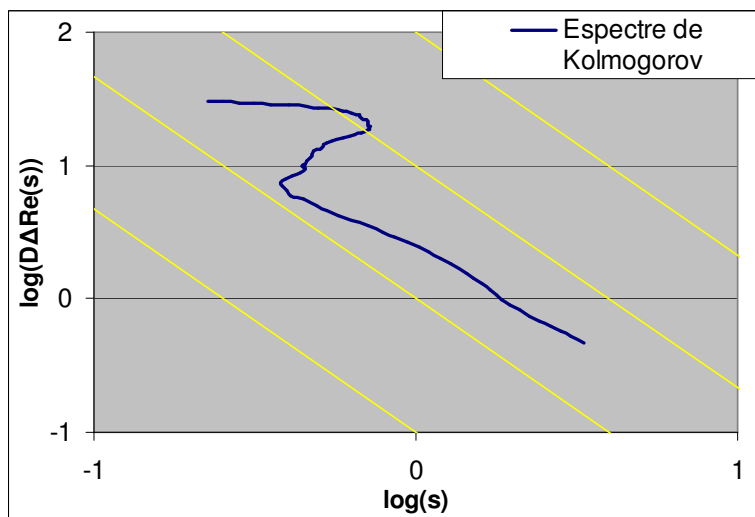
La modelització de la funció empírica d'autocovariança en aquest cas, és també una paràbola exponencial. La descripció de la MAF s'aproxima a les dades empíriques, dibuixant però una corba bastant més estable.





**Fig. 2.26** MAF de la Fig. 2.25 amb una funció paràbola exponencial.

L'espectre de Kolmogorov presenta la tendència pròpia de l'estructura de turbulència  $-5/3$  en gairebé tota la imatge. Les fluctuacions a l'espectre vénen donades per la desviació de la tendència a la EAF (blau a la gràfica de la Fig. 2.25) a distàncies superiors al 20km.



**Fig. 2.27** Espectre de Kolmogorov de la Fig. 2.25

## CAPÍTOL 3. REDUCCIÓ DELS EFECTES ATMOSFÈRICS

Les observacions del capítol 2 demostren com la component atmosfèrica  $\Phi_{\text{Atm}}$  presenta la part correlada de la fase interferomètrica diferencial. Sovint, els efectes atmosfèrics es descriuen segons l'espectre de potència de la funció d'autocorrelació. A la EAF, que conté informació equivalent a l'espectre de potència, es pot veure com un interferograma poc afectat pels efectes atmosfèrics es caracteritza per tenir valors propers a 0 de la varianza  $\sigma_s^2$  i de la longitud de correlació  $L_C$ , mentre que en presència d'heterogenitats atmosfèriques ambdós paràmetres són significativament diferents de 0. Prenent com a avantatge aquesta característica, es possible extreure el senyal sobre zones estables i predir el sobre zones de subsidència.

### 3.1 Tècnica de filtratge i de predicció

Per a predir el senyal extret de zones estables sobre zones de subsidència, es necessària una tècnica de filtratge que funciona amb el mètode de col·locació de mínims quadrats, molt utilitzat a geodèsia. Durant aquest procés, el senyal atmosfèric estimat  $\Phi_{\text{Ae}}$  es resta de la fase interferomètrica  $\Phi_{\text{D-Int}}$ , reduint així els efectes atmosfèrics. Després d'aquest filtratge, és possible que manqui una component residual:

$$\Phi_{\text{Ares}} = \Phi_{\text{Atm}} - \Phi_{\text{Ae}} \quad (3.1)$$

Assumint que la  $\Phi_{\text{D-Int}}$  sobre les zones estables és una realització en 2D d'un procés estocàstic estacionari, el mètode de col·locació separa el senyal  $\Phi_{\text{Atm}}$  del soroll, utilitzant la EAF, que es estimada a partir de les dades originals  $\Phi_{\text{D-Int}}$ . A més de filtrar, també prediu el senyal sobre zones desconegudes, és a dir, sobre zones on mai s'ha tingut informació anterior.

Aquest procediment ofereix dos grans avantatges:

- primerament, explota al màxim tota la informació disponible descrita per la EAF
- segonament, proporciona un filtre adaptatiu, guiat per la EAF, sense necessitat d'un model de  $\Phi_{\text{Atm}}$ .

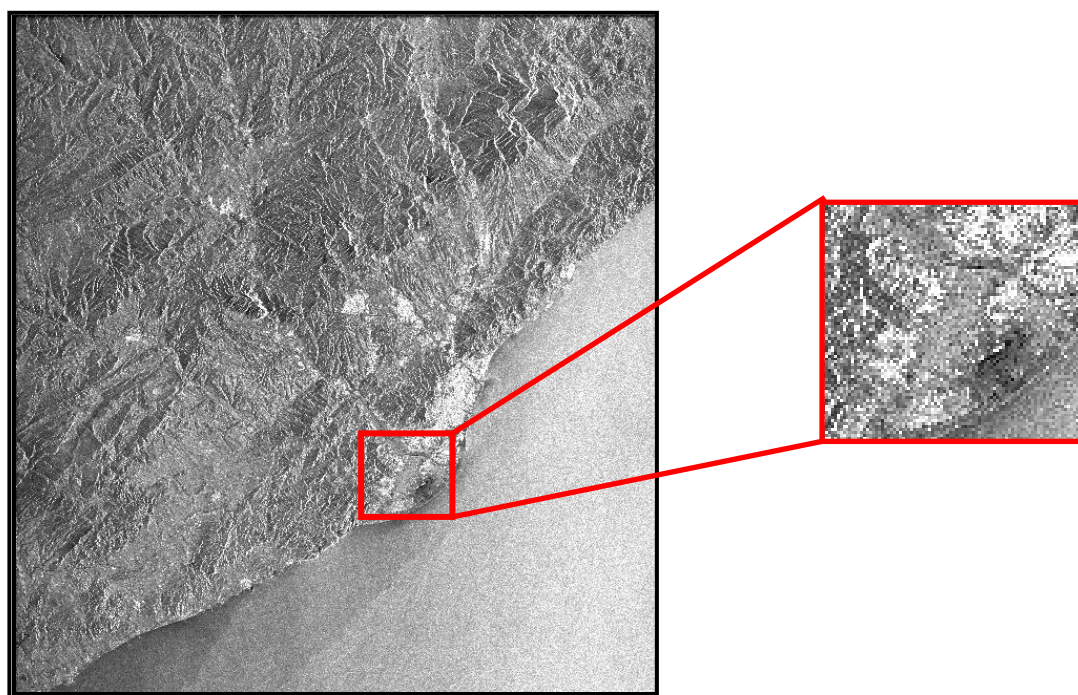
Aquest mètode és molt més flexible que qualsevol altre mètode clàssic d'interpolació, oferint a més a més, tres característiques destacables:

- prediu els valors de  $\Phi_{\text{Ae}}$  que tendeixen a la mitja de  $\Phi_{\text{D-Int}}$  sobre les zones estables quan la varianza  $\sigma_s^2$  de la predicció incrementa ( $\sigma_s^2$  creix amb la distància a zones estables properes)

- garanteix que el senyal estimat no divergeixi de qualsevol ubicació distant de la predicció, com acostuma a passar amb procediments d'extrapolació basats en models teòrics
- finalment, és una tècnica que proporciona senyals filtrats i estimats associats a les seves matrius de variança-covariança, que descriuen completament el procés estocàstic [6].

### 3.2 Anàlisi i interpretació dels resultats

Per a la verificació dels processos de filtratge i de predicció és selecciona una àrea d'un màxim de 10.000 punts d'una graella irregular, que és la màxima capacitat de processat del programa. En aquest cas, s'ha seleccionat la zona del delta del Llobregat. Les imatges resultants tenen unes dimensions de 103x104 píxels, que equival a una graella regular de 16x16km aproximadament.



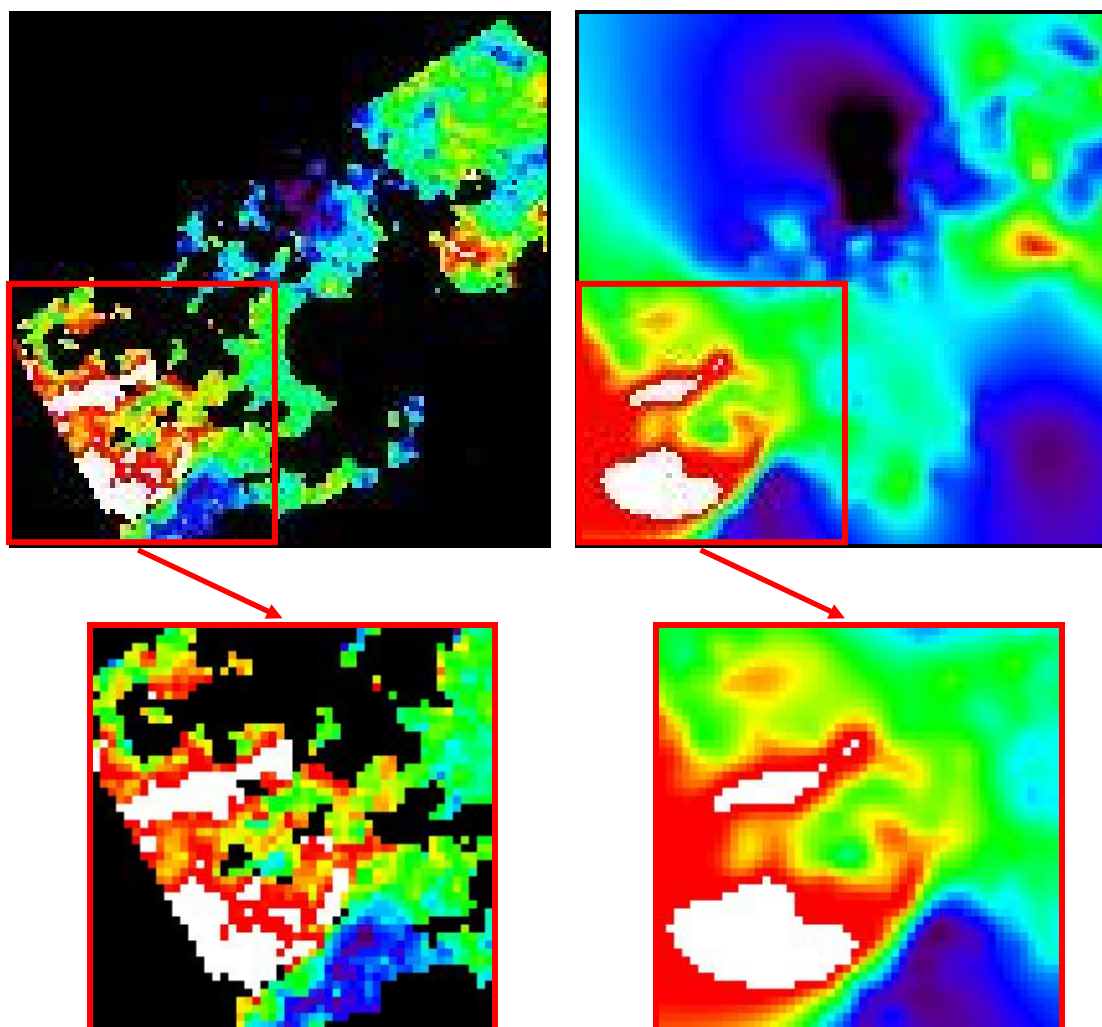
**Fig. 3.1** Imatge SAR de Catalunya amb zoom x3 de la zona a processar.

El programa de col·locació (*collo*) calcula una matriu de covariances a partir de l'interferograma original i la seva funció d'autocorrelació. Primerament, es crea una graella regular de punts on s'hi troben els punts que contenen informació. Amb el model de la funció d'autocorrelació, es calculen estadísticament els valors desconeguts, segons la distància i el grau de correlació entre ells. Finalment, amb el programa de predicció (*preditp\_grid*), s'obté una graella regular amb informació de fase a tots els seus corresponents punts.

A l'exemple de la figura següent es pot comprovar la validesa d'aquesta tècnica. Tot i que la imatge original conté nombrosos buits (amb valor de fase igual a -10), és possible avaluar la correcta funcionalitat de la predicció dins de les zones que disposen tant d'informació com de llacunes petites on no n'hi ha. A les zones de la part superior de l'interferograma original (zones de color negre), on no hi ha informació, no serà fiable la seva estimació, perquè només es prendran com a referència els valors de la frontera, basant la predicció només en aquells punts.

Per comparar l'imatge original amb la imatge resultant, es 'linquen' els dos interferogrames i s'analitzen els valors de les respectives fases a la mateixa coordenada. L'estimació a les llacunes que es troben rodejades de píxels amb informació manté la relació amb el conjunt de dades que les envolten, en canvi a les zones buides fora d'àrees d'informació, aquesta estimació és a simple vista bona, però no és vàlida per a l'estudi perquè la predicció només té en compte els valors de la frontera.

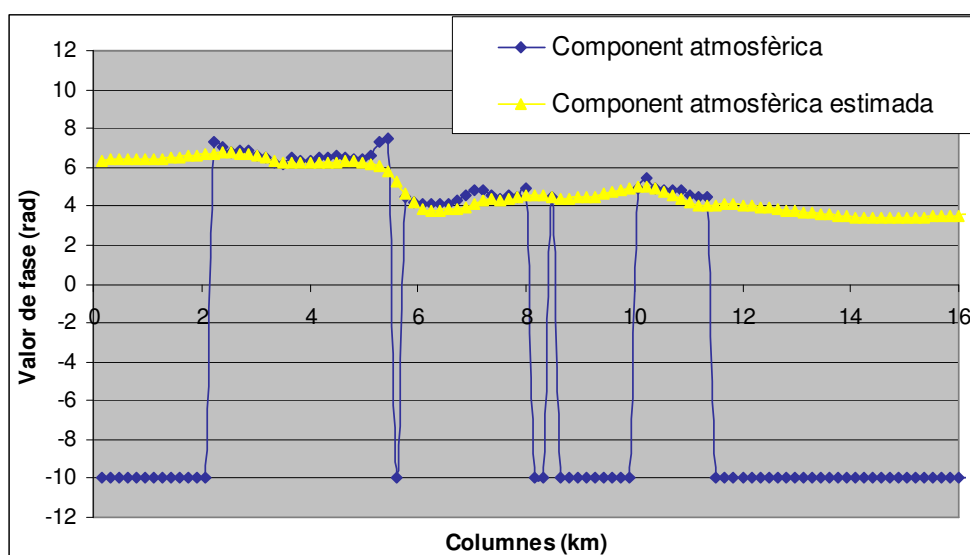
La tècnica es comprova mitjançant l'observació visual i l'anàlisi de les fases. Es selecciona una part de la imatge que pot ser interessant per a l'estudi, ja que conté nombroses llacunes rodejades de zones amb informació.



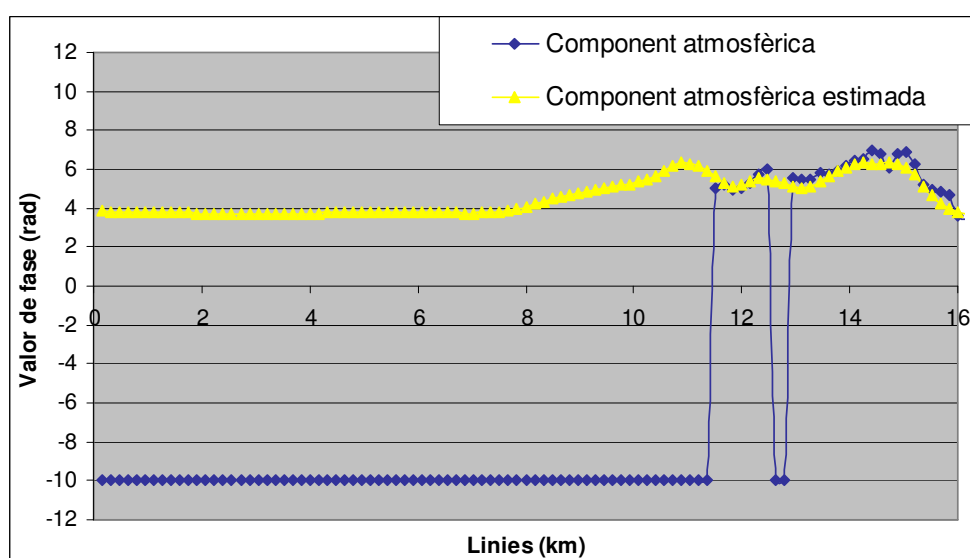
**Fig. 3.2** A la part superior esquerra imatge original, a la dreta imatge resultant.  
A la part inferior zoom x2 de la zona analitzada.

Les següents gràfiques mostren els valors de les fases en funció de la distància. Es tracta d'una anàlisi en 2D de la imatge, fixant un punt qualsevol de la imatge. La primera gràfica mostra el perfil en l'eix de les x del punt fixat i la segona mostra el perfil en l'eix de les y.

Els valors de la component atmosfèrica estimada s'ajusten correctament amb els valors originals, interpolant mitjançant el càlcul de les variàncies les zones on no hi ha informació i filtrant pas baix les zones amb dades originals, suavitzant els pics.



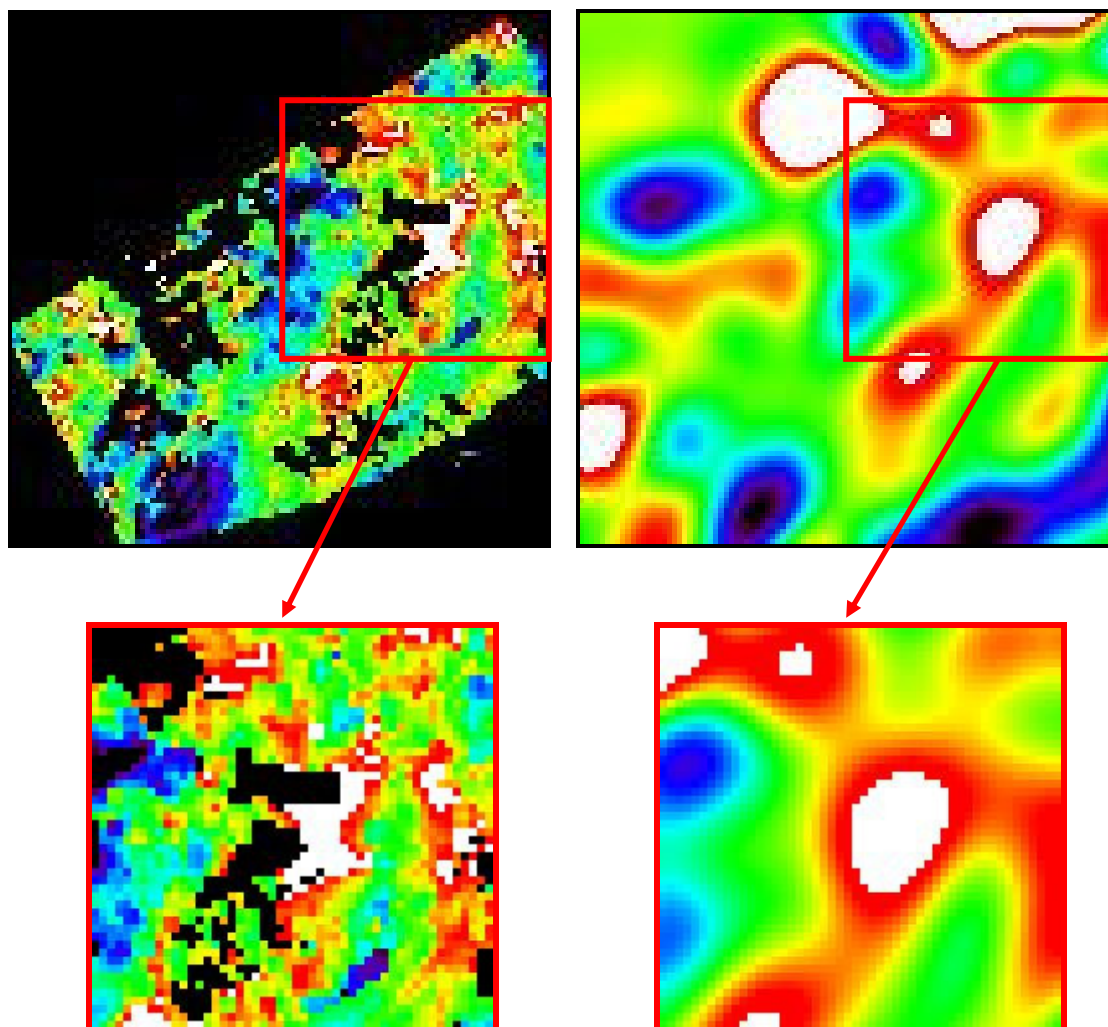
**Fig. 3.3** Perfil en X de les dues imatges a la mateixa coordenada.



**Fig. 3.4** Perfil en Y de les dues imatges a la mateixa coordenada.

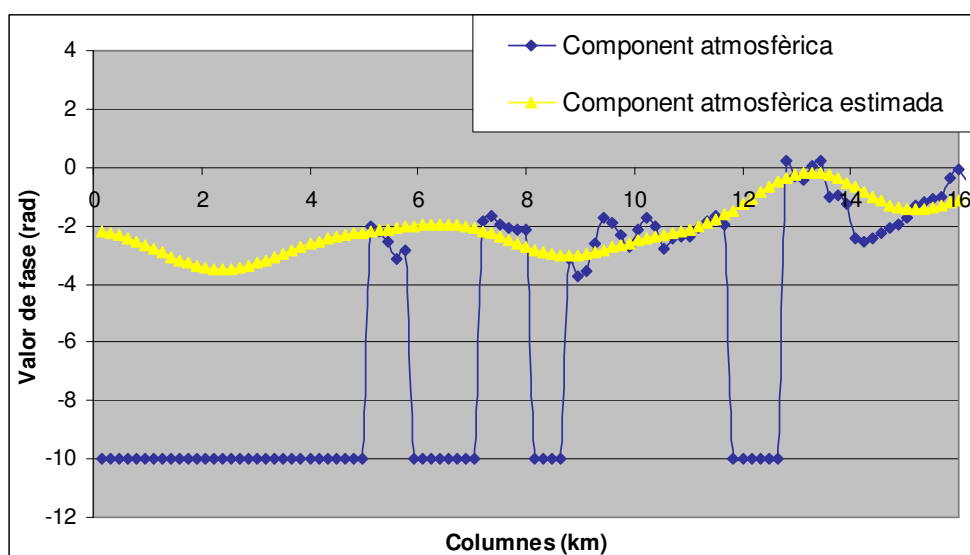
En aquest altre exemple es confirma el bon funcionament de la tècnica de filtratge i predicció. L'interferograma original conté petites zones sense informació, que seran molt útils per a la comprovació de la estimació.

Aquest exemple ha estat seleccionat, perquè no només s'observen clarament les zones estimades, sinó que a més es veu com la tècnica de filtratge esborra de la imatge les altes freqüències (a l'esquerra a baix del zoom x2). La zona de color blau, corresponent a pics de fase, és suavitzada, resultant en una zona verda a l'estimació.

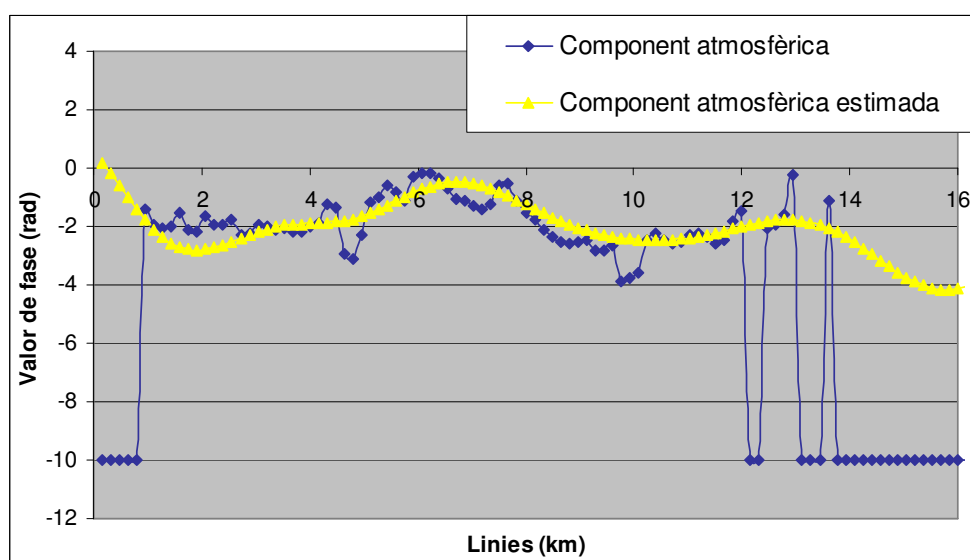


**Fig. 3.5** A la part superior esquerra imatge original, a la dreta imatge resultant.  
A la part inferior zoom x2 de la zona analitzada.

De la mateixa manera que a l'exemple anterior, les gràfiques mostren com la component atmosfèrica estimada suavitza els pics de la component original, i estima de forma aproximada les zones que no tenen informació.



**Fig. 3.6** Perfil en X de les dues imatges a la mateixa coordenada.



**Fig. 3.7** Perfil en Y de les dues imatges a la mateixa coordenada.

La correcta funcionalitat d'aquesta tècnica es repeteix en altres exemples [veure Annex 1].



## CONCLUSIONS

La interferometria diferencial DInSAR és una de les tècniques que permet mesurar moviments del terreny, durant l'adquisició de les imatges SAR. En aquest projecte s'ha pogut comprovar com les diferents condicions atmosfèriques provoquen errors importants en l'estimació de les deformacions.

Gràcies a les característiques de correlació de l'atmosfera, és possible mesurar una sèrie de paràmetres estadístics que es repeteixen de forma sistemàtica en tots els interferogrames observats. Aquesta repetitivitat permet que a partir d'un conjunt d'imatges sota estudi, es pugui extreure un model vàlid per a tots els interferogrames que aproximi la component atmosfèrica.

A més, la component atmosfèrica es pot modelar segons la llei de potència de la Teoria de Kolmogorov, on les turbulències atmosfèriques provoquen fluctuacions a la fase diferencial interferomètrica, seguint una tendència determinada que es repeteix a totes les imatges observades.

Amb el model atmosfèric es calcula una matriu de covariances sobre tot l'interferograma, que en funció de les relacions entre els valors de fase dels píxels que conformen la imatge, converteix graelles irregulars de punts a graelles regulars amb una estimació bona.

La tècnica de filtratge i de predicció resulta funcionar de forma correcta, ja que interpola les zones on no hi ha informació disponible segons la varianza dels punts al voltant i l'autocorrelació a tota la imatge, seguint el mètode de col·locació per mínims quadrats. A més d'interpol·lar, la tècnica filtra les altes components freqüencials, comportant-se com a filtre pas baix, deixant passar les baixes freqüències, típicament del comportament atmosfèric.

Poder predir la component atmosfèrica de la fase interferomètrica permet disminuir les fonts d'error, que provoquen ambigüitat en el càlcul de les deformacions del terreny.

El treball realitzat en aquest projecte m'ha permès entrar en contacte amb un sector de les telecomunicacions no inclòs al pla d'estudis. D'aquesta manera he pogut adquirir nous coneixements dins l'àmbit de la investigació, com ara la programació (especialment sota linux), el processament de dades, l'estadística, l'observació i l'anàlisi de resultats.

Durant la realització d'aquest estudi he pogut comprovar com, mitjançant satèl·lits ambientals, particularment aquells equipats amb el dispositiu SAR, s'estudien diferents fenòmens terrestres, meteorològics i marins, tals com moviments sísmics, subsidències, remolins, corrents, ciclons, pluges, etc. Els Radar d'Obertura Sintètica permeten formar, mitjançant un elaborat processat del senyal radar, imatges de la superfície terrestre amb resolucions de l'ordre de metres. Les aplicacions potencials d'aquests sistemes són innumerables, com l'obtenció de models topogràfics d'alta precisió, la determinació de recursos hídrics, vegetació, etc.

Els sistemes de radar utilitzen un transmissor de ràdio d'alta freqüència que emet radiacions electromagnètiques. En general, la societat mostra una creixent preocupació per la incidència que pugui tenir en la salut l'exposició involuntària o inconscient a camps electromagnètics (CEM).

L'origen d'aquesta inquietud es troba en la publicació, fa anys, d'estudis epidemiològics que associen aquesta exposició a camps electromagnètics de freqüències extremadament baixes, procedents de línies d'alta tensió, amb determinats tipus de patologies. No obstant, aquest interès social s'ha intensificat als últims anys com a conseqüència de la continuada instal·lació d'antenes de telefonia i radars.

A favor de la utilització d'aquesta tecnologia s'ha de dir que no s'ha identificat fins el moment cap mecanisme biològic que mostri una possible relació causal entre l'exposició a CEM i el risc de patir cap enfermetat.

A més, la monitorització de paràmetres geofísics està impulsant el desenvolupament de nous sensors radar aerotransportats o embarcats en satèl·lits, degut a la forta preocupació per l'estabilitat climàtica i biològica del nostre planeta. S'espera una utilització progressiva d'aquestes tècniques als pròxims anys per part de les administracions medioambientals, de planificació de recursos, territori, etc. que també prendran decisions polítiques que afectaran a tots. Dins l'àmbit de la ciència i l'enginyeria el desenvolupament d'aquestes tècniques es traduirà en oportunitats de feina en la indústria d'alta tecnologia i espacial i també en el sector de serveis afegits derivats de les dades.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Cardama Aznar, A., L. Jofre Roca, J.M. Rius Casals, J. Romeu Robert, S. Blanch Boris, M. Ferrando Bataller, "Antenas", Edicions UPC, Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, 1998.
- [2] Tarayre, H. and Massonnet, D., "Atmospheric propagation heterogeneities revealed by ERS-1", *Geophysical Research letters*, Vol. 23, NO.9, 1996.
- [3] Hanssen, R., "Atmospheric heterogeneities in ERS tandem SAR interferometry", Delft University Press, Delft, The Netherlands, 1998.
- [4] Ruf, C.S., and Beus, S.E., "Retrieval of Tropospheric water vapor scale height from horizontal turbulence structure". *IEEE Trans. On Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 35, NO.9, 1997
- [5] Tatarski, V.I., "Wave propagation in a Turbulent Medium", McGraw-Hill, 1961
- [6] Crosetto, M., C.C. Tschering, B. Crippa and M. Castillo, "Subsidence monitoring using SAR interferometry: Reduction of the atmospheric effects using stochastic filtering", *Geophysical Research Letters*, Vol.29, NO.9, 2002.
- [7] [http://www.fao.org/documents/show\\_cdr.asp?url\\_file=/docrep/003/x8763s/x8763s0a.htm](http://www.fao.org/documents/show_cdr.asp?url_file=/docrep/003/x8763s/x8763s0a.htm)
- [8] [http://www.ucm.es/info/crismine/Geologia\\_Minera/Estimacion\\_reservas.htm](http://www.ucm.es/info/crismine/Geologia_Minera/Estimacion_reservas.htm)
- [9] <http://www.gisdevelopment.net/technology/sar/ma03083abs.htm>
- [10] [http://www.puc.cl/agronomia/d\\_investigacion/Proyectos/ProyectosTitulos/pdf/CienciasForestales/IngridCea.pdf](http://www.puc.cl/agronomia/d_investigacion/Proyectos/ProyectosTitulos/pdf/CienciasForestales/IngridCea.pdf)
- [11] <http://arfiexp.tripod.com/#1>





**Escola Politècnica Superior  
de Castelldefels**

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

# ANNEXOS

**TÍTOL:** Elaboració i anàlisi d'imatges radar des de satèl·lit: monitorització de deformacions de terreny

**TITULACIÓ:** Enginyeria Tècnica de Telecomunicació, especialitat Sistemes de Telecomunicació

**AUTORA:** Laura Arroyo Clavell

**DIRECTOR:** Michele Crosetto

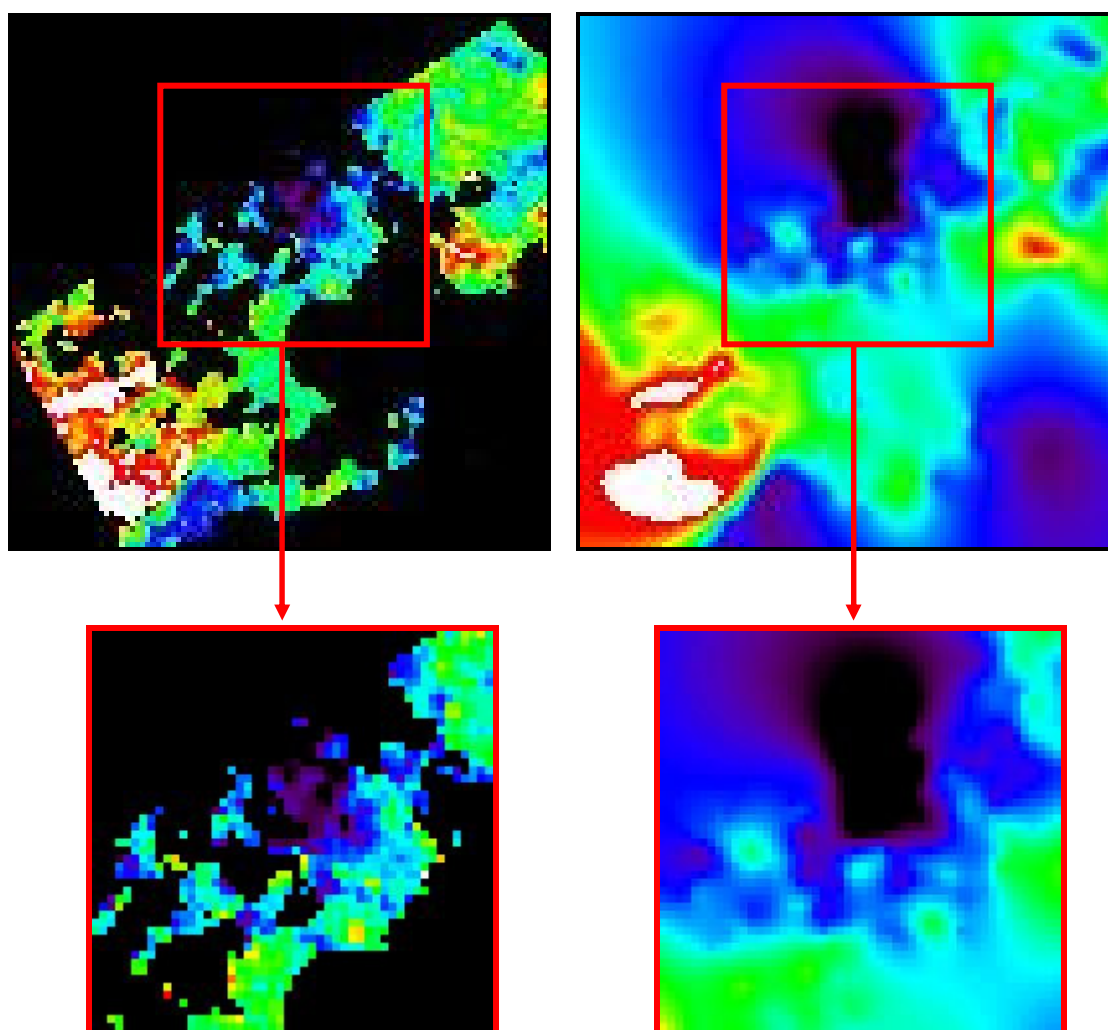
**SUPERVISOR:** Jaume Piera Fernández

**DATA:** 7 de juliol de 2006

## ANNEX 1. FILTRATGE I PREDICCIÓ

### 1.1 Exemple 1

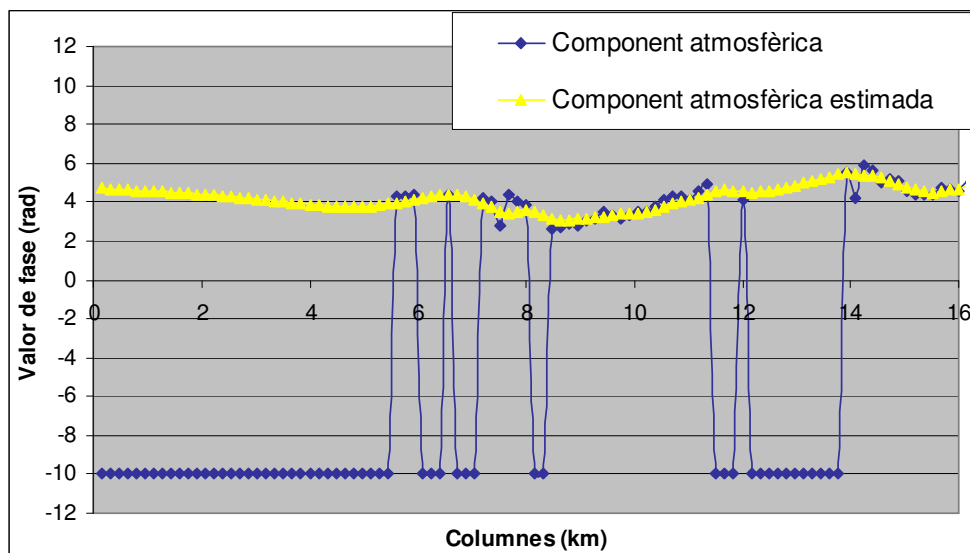
La tècnica es comprova mitjançant l'observació visual i l'anàlisi de les fases. Es selecciona una part de la imatge que pot ser interessant per a l'estudi, ja que conté nombroses llacunes rodejades de zones amb informació.



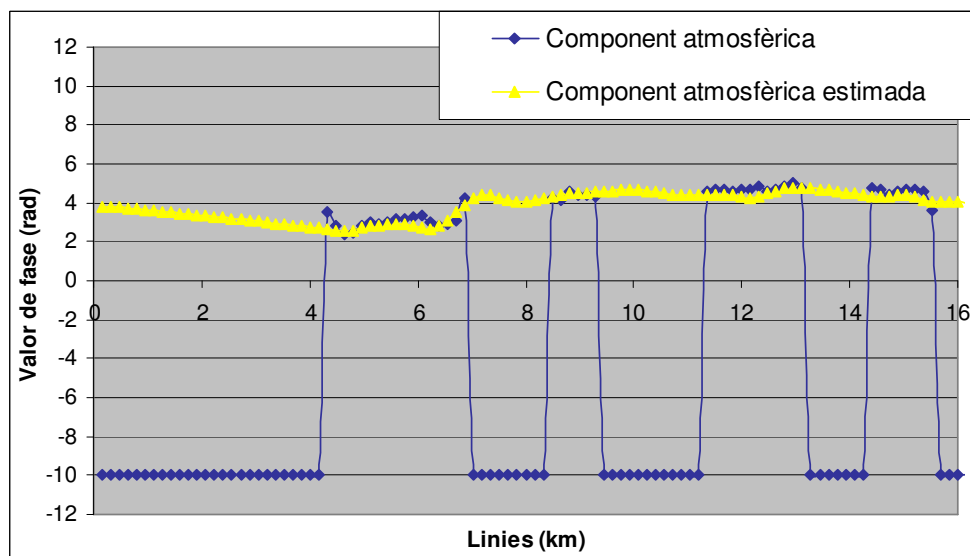
**Fig. 1.1** A la part superior esquerra imatge original, a la dreta imatge resultant.  
A la part inferior zoom x2 de la zona analitzada.

Les següents gràfiques mostren els valors de les fases en funció de la distància. Es tracta d'una anàlisi en 2D de la imatge, fixant un punt qualsevol de la imatge. La primera gràfica mostra el perfil en l'eix de les x del punt fixat i la segona mostra el perfil en l'eix de les y.

Els valors de la component atmosfèrica estimada s'ajusten correctament amb els valors originals, interpolant mitjançant el càlcul de les variances les zones on no hi ha informació i filtrant pas baix les zones amb dades originals, suavitzant els pics.



**Fig. 1.2** Perfil en X de les dues imatges a la mateixa coordenada.

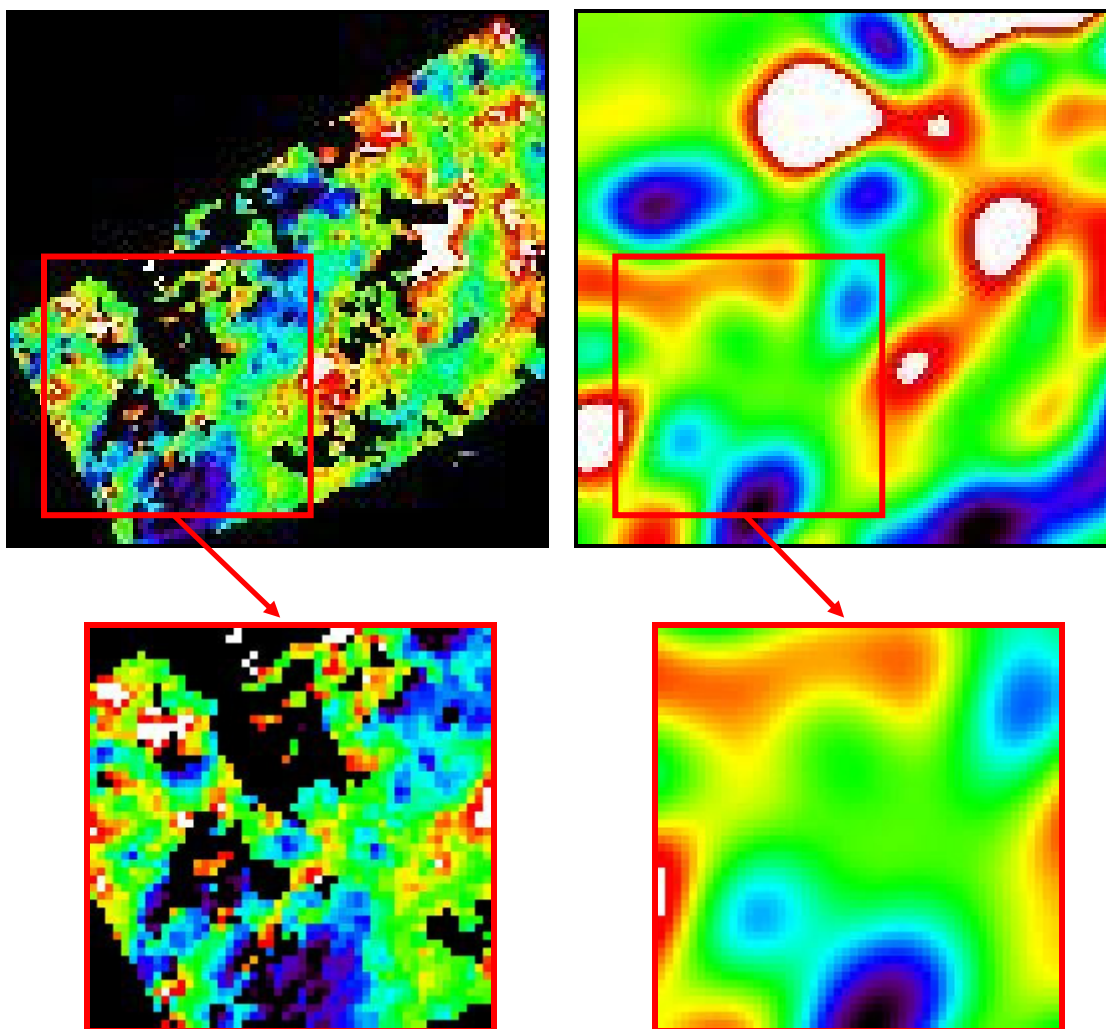


**Fig. 1.3** Perfil en Y de les dues imatges a la mateixa coordenada.

## 1.2 Exemple 2

En aquest altre exemple es confirma el bon funcionament de la tècnica de filtratge i predicció. L'interferograma original conté petites zones sense informació, que seran molt útils per a la comprovació de la estimació.

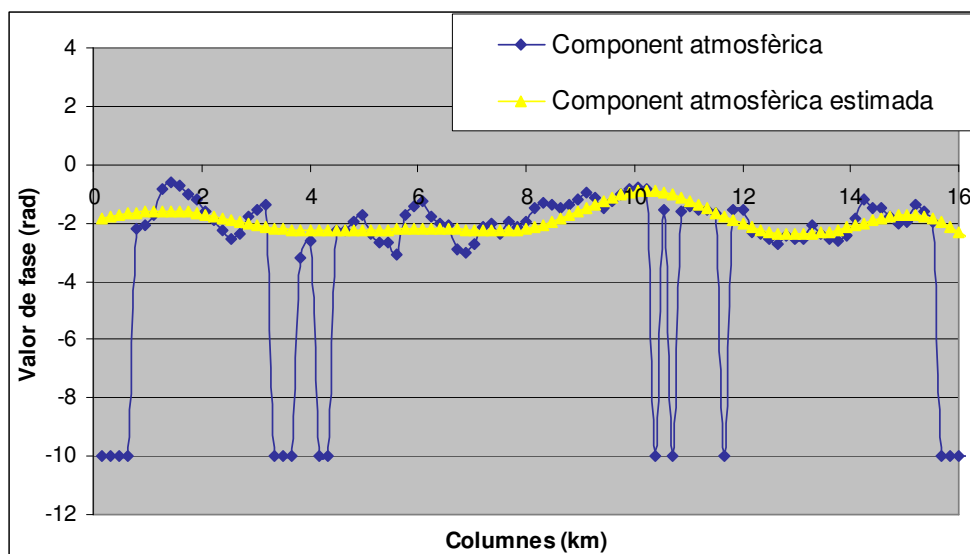
Aquest exemple ha estat seleccionat, perquè no només s'observen clarament les zones estimades, sinó que a més es veu com la tècnica de filtratge esborra de la imatge les altes freqüències (a l'esquerra a baix del zoom x2). La zona de color blau, corresponent a pics de fase, és suavitzada, resultant en una zona verda a l'estimació.



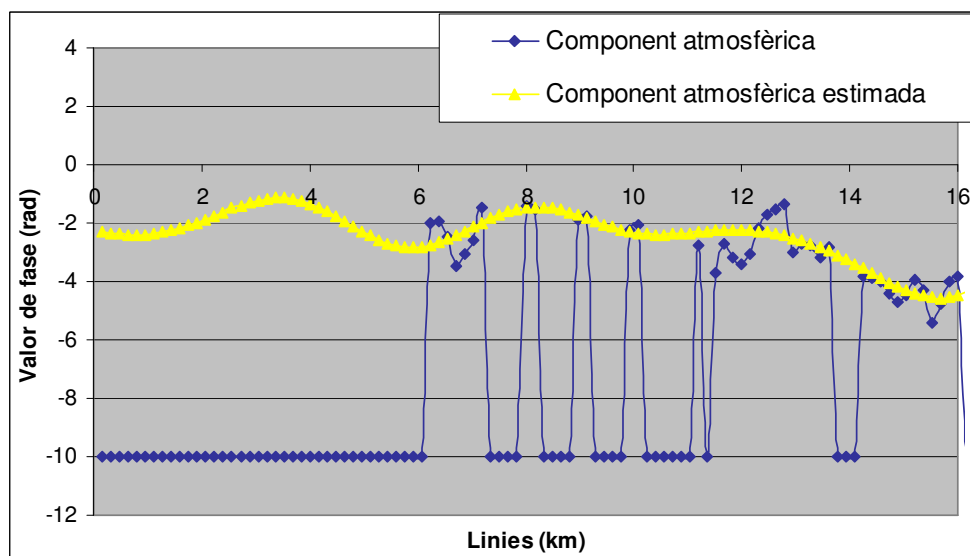
**Fig. 1.4** A la part superior esquerra imatge original, a la dreta imatge resultant.  
A la part inferior zoom x2 de la zona analitzada.



De la mateixa manera que a l'exemple anterior, les gràfiques mostren com la component atmosfèrica estimada suavitza els pics de la component original, i estima de forma aproximada les zones que no tenen informació.



**Fig. 1.5** Perfil en X de les dues imatges a la mateixa coordenada.



**Fig. 1.6** Perfil en Y de les dues imatges a la mateixa coordenada.

## ANNEX 2. FILTRES ESPACIALS

### 2.1 Domini espacial

El terme de domini espacial es refereix al conjunt de píxels que componen una imatge i els mètodes en el domini espacial són procediments que operen directament sobre els píxels. Les funcions de processament de la imatge en el domini espacial poden expressar-se com:

$$g(x, y) = T[f(x, y)] \quad (2.1)$$

on:

$f(x, y)$  és la imatge d'entrada;

$g(x, y)$  és la imatge processada, i

$T$  és l'operador que actua sobre  $f$ , definit en algun entorn de  $(x, y)$ .

L'aproximació principal per a definir un entorn al voltant de  $(x, y)$  és emprant una àrea de subimatge quadrada i rectangular centrada en  $(x, y)$ .

El centre de la subimatge es mou píxel a píxel començant, per exemple, a la cantonada superior esquerra i aplicant l'operador a cada posició  $(x, y)$  per a obtenir  $g$ . La idea general consisteix en determinar  $g$  en un punt  $(x, y)$  a partir dels valors de  $f$  en un entorn predefinit de  $(x, y)$ .

Una de les aproximacions principals en aquest tipus de formulació es basa en l'ús de les anomenades màscares (també anomenades kernel, finestres, filtres...). Bàsicament, una màscara és una petita distribució bidimensional (3x3, 5x5...) en la que els valors dels coeficients determinen la naturalesa del procés. Les tècniques de processament de dades en aquest tipus d'aproximació es coneixen sovint com processament per màscares o filtrat.

### 2.2 Domini freqüencial

La base del processament de dades en el domini de la freqüència és el teorema de convolució. Sigui  $g(x, y)$  una imatge formada per la convolució d'una imatge  $f(x, y)$  i un operador lineal invariant de posició  $h(x, y)$ , és a dir:

$$g(x, y) = h(x, y) * f(x, y) \quad (2.2)$$

llavors, pel teorema de convolució es compleix la segona relació en el domini de la freqüència:

$$G(u, v) = H(u, v) \cdot F(u, v) \quad (2.3)$$

on  $G$ ,  $H$  i  $F$  són respectivament les transformades de Fourier de  $g$ ,  $h$  i  $f$ .

En una aplicació típica de filtrat,  $f(x, y)$  és coneguda i l'objectiu, després de calcular  $F(u, v)$ , és seleccionar  $H(u, v)$  de forma que la imatge obtinguda,

$$g(x, y) = F^{-1}[H(u, v) \cdot F(u, v)] \quad (2.4)$$

presenti ressaltada alguna característica de  $f(x, y)$ .

$$\begin{aligned} f(x, y) &\Rightarrow h(x, y) \Rightarrow g(x, y) \\ F(u, v) &\Rightarrow H(u, v) \Rightarrow G(u, v) \end{aligned} \quad (2.5)$$

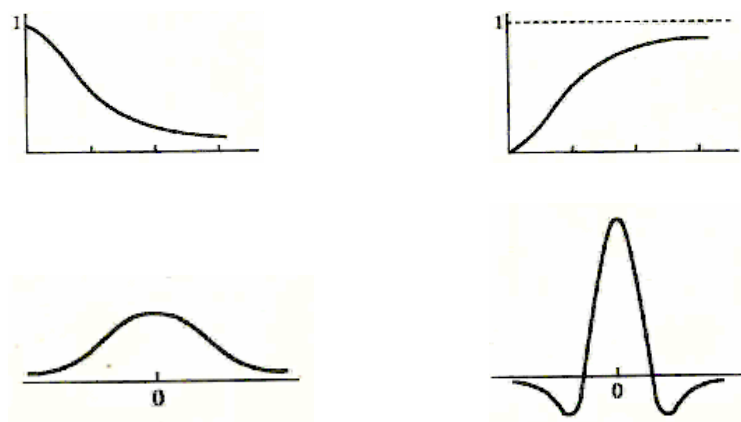
$h(x, y)$  caracteritza un sistema que té com a finalitat produir una imatge de sortida  $g(x, y)$  a partir d'una imatge d'entrada  $f(x, y)$ . El sistema realitza la convolució d' $h(x, y)$  amb la imatge d'entrada i dona el resultat com a sortida. El teorema de convolució permet tenir una visió diferent del procés en el sentit que un mateix resultat es pot obtenir també multiplicant  $F(u, v) \cdot H(u, v)$  per donar  $G(u, v)$ . Prenent en aquest cas la Transformada Inversa de Fourier de la sortida  $G(u, v)^{-1}$  s'obté la imatge desitjada  $g(x, y)$ .

## 2.3 Filtrat espacial

L'ús de màscares espacials per al processament de les imatges es denomina freqüentment filtrat espacial, i les pròpies màscares s'anomenen filtres espacials.

Els filtres lineals es basen en els conceptes, que afirmen que la funció de transferència i l'impuls o funció de distribució puntual d'un sistema lineal són Transformades de Fourier inverses una de l'altre. Els filtres anomenats de pas baix atenuen o eliminen les components d'alta freqüència en el domini de Fourier a la vegada que deixen inalterables les baixes freqüències. Les components d'alta freqüència caracteritzen les vores i els detalls restants molt marcats de la imatge, i per això l'efecte d'introduir un filtrat de pas baix és el de fer més borrosa la imatge. De forma similar, els filtres de pas alt atenuen o eliminen les components de baixa freqüència. Com que aquestes components són responsables de les característiques lentament variables de la imatge, com són el contrast global i la intensitat mitja, el resultat net d'un filtrat de pas alt és la reducció d'aquestes característiques i, en correspondència, una aparent agudització de les vores i dels detalls fins. Per a l'objectiu d'aquest projecte es faran servir els filtres de pas baix, per eliminar les altes freqüències de l'atmosfera.

La figura 2.1 mostra les seccions transversals de filtres pas baix i pas alt amb simetria circular, en el domini freqüencial i els seus corresponents filtres espacials. Els eixos horitzontals de les figures de la fila superior són freqüències, i els seus corresponents a la fila inferior són coordenades espacials. Els perfils de la fila inferior poden ser emprats com a indicació per a especificar els filtres espacials lineals. No obstant, amb independència del tipus de filtre lineal emprat, l'aproximació bàsica consisteix en sumar productes entre els coeficients de la màscara i les intensitats dels píxels sota la màscara en un punt determinat de la imatge.



**Fig. 2.1** A l'esquerra, filtre pas baix. A la dreta, filtre pas alt.

La figura següent mostra una màscara 3x3 general. La resposta d'una màscara lineal és:

$$R = w_1 z_1 + w_2 z_2 + w_3 z_3 + \dots + w_9 z_9 \quad (2.6)$$

on:

$z_i$ , és el valor del corresponent píxel sota la màscara.

$w_1$	$w_2$	$w_3$
$w_4$	$w_5$	$w_6$
$w_7$	$w_8$	$w_9$

**Fig. 2.2** Màscara 3x3 genèrica

Si el centre de la màscara es troba en un punt  $(x, y)$  de la imatge, el valor del píxel situat en  $(x, y)$  es substitueix per  $R$ . La màscara es mou fins a l'emplaçament del següent píxel de la imatge i es repeteix el procés. Es continua així fins que s'han cobert tots els píxels de la imatge. El valor de  $R$  es calcula emprant entorns parcials per als píxels que estan col·locats en les vores de la imatge. També és habitual crear una nova imatge per a emmagatzemar els valors de  $R$ , enlloc d'anar canviant cada vegada els valors de cada píxel, ja que així s'evita l'ús de valors en l'equació que hagin sigut alterats com a resultat d'una aplicació anterior d'aquesta operació.

Els filtres espacials no lineals operen també en entorns. No obstant, en general la seva operació es basa directament en els valors dels píxels en l'entorn en consideració i no empen explícitament els coeficients de la forma descrita anteriorment. En aquest cas, la reducció de soroll es pot realitzar eficaçment amb un filtre no lineal, on la seva funció bàsica es la de calcular el valor mig de les lluminositats en màxim, que s'utilitza per a buscar els punts més brillants d'una imatge, i el filtre de mínim, que s'utilitza amb l'objectiu contrari.

### 2.3.1 Filtre suavitzant

Els filtres suavitzants s'utilitzen per a fer que la imatge aparegui una mica borrosa en algunes etapes del preprocesament, com l'eliminació dels petits detalls d'una imatge abans de l'extracció d'un objecte gran, i l'ompliment de petits espais entre línies o corbes. La reducció pot realitzar-se mitjançant l'augment de la borrositat amb un filtre lineal o també amb un filtre no lineal.

### 2.3.1.1 Filtre pas baix

La forma de resposta d'un impuls necessària per a implementar un filtre espacial de pas baix indica que el filtre ha de tenir tots els seus coeficients positius. Encara que la forma del filtre espacial pugui ser descrita, per exemple, per una funció gaussiana, el requisit clau és que tots els coeficients siguin positius. Per a un filtre espacial 3x3, la construcció més simple consistiria en una màscara en la que tots els coeficients fossin iguals a 1. Per l'equació anterior, la resposta seria, en aquest cas, la suma dels valors dels nou píxels, el que podria fer que  $R$  es sortís del rang vàlid. La solució consisteix en canviar l'escala de la suma dividint  $R$  per 9. La següent figura mostra la màscara resultant. Les figures següents mostren màscares més grans que segueixen el mateix concepte. Observem que en aquests casos la resposta  $R$  simplement serà la mitja de tots els píxels en l'àrea de la màscara. Per això, l'ús de màscares de la forma de la figura 2.3 denomina sovint com *promitjats en l'entorn*.

1	1	1
1	1	1
1	1	1

1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1

**Fig. 2.3** Màscares 3x3 i 6x6 pas baix promitjats de l'entorn

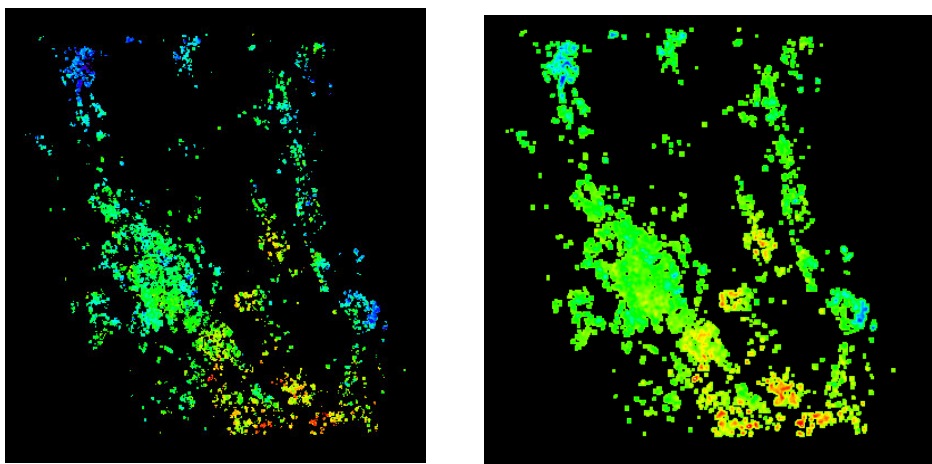
1	2	1
2	4	2
1	2	1

1	1	1
1	4	1
1	1	1

**Fig. 2.4** Màscares 3x3 pas baix gaussianes

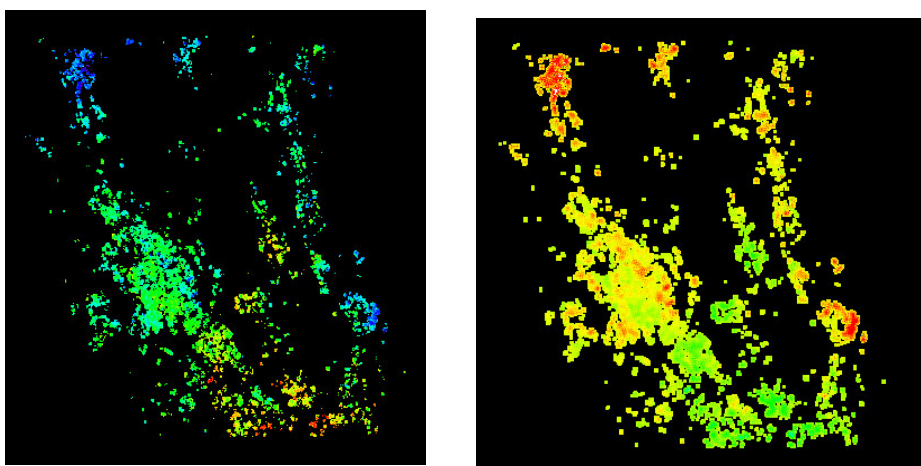
### 2.3.1.2 Exemples

#### 2.3.1.2.1 Filtre pas baix



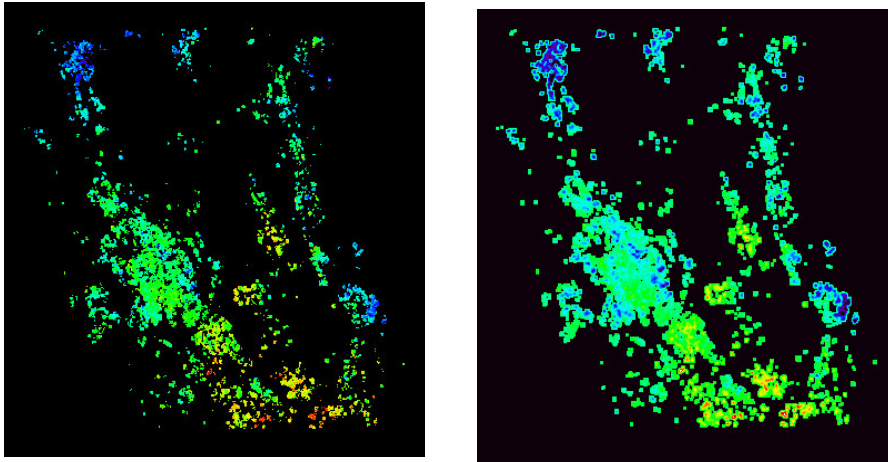
**Fig. 2.5** A l'esquerra, imatge original. A la dreta, imatge filtrada.

#### 2.3.1.2.2 Filtre mediana



**Fig. 2.6** A l'esquerra, imatge original. A la dreta, imatge filtrada.

### 2.3.1.2.3 Filtre gaussià



**Fig. 2.7** A l'esquerra, imatge original. A la dreta, imatge filtrada.

## 2.3.2 Filtre realçant

L'objectiu principal del realçament és el de destacar els detalls dins d'una imatge o intensificar detalls que han sigut difuminats, ja sigui per error o per efecte natural del mètode d'adquisició de la imatge. Les utilitats del realçament de les imatges són variades i inclouen aplicacions a diferents camps tècnics.

### 2.3.2.1 Filtre pas alt

El perfil de la resposta a un impuls necessària per a implementar un filtre espacial pas alt (realçant) indica que el filtre ha de tenir coeficients positius a prop del centre i coeficients negatius en la perifèria. Per a una màscara de 3x3 aquesta condició es compleix escollint un valor positiu al centre i prenent coeficients negatius per a la resta.

La següent figura mostra la implementació més clàssica d'un filtre de realçament 3x3. Observem com la suma de tots els coeficients és 1. així, quan la màscara estigui sobre una àrea de valors constants o lentament variable, la sortida proporcionada per la màscara és un valor molt petit. Aquest resultat és coherent amb el que s'espera del corresponent filtre en el domini freqüencial mostrat en la figura.

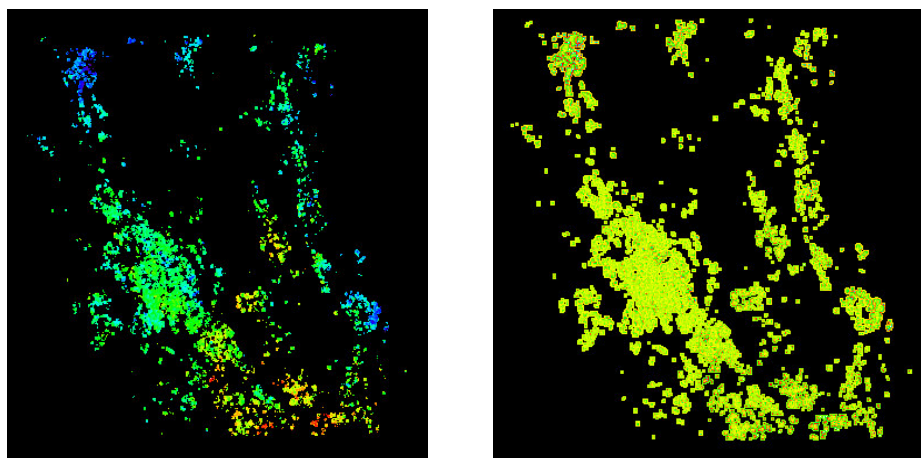
-1	-1	-1	0	-1	0	1	-2	1
-1	9	-1	-1	5	-1	-2	5	-2
-1	-1	-1	0	-1	0	1	-2	1

**Fig. 2.8** Màscares 3x3 pas alt gaussianes



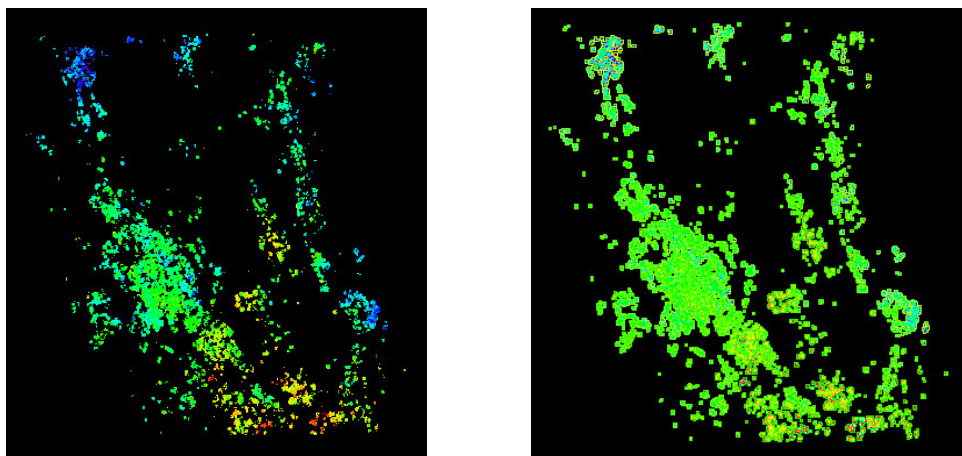
### 2.3.2.2 Exemples

#### 2.3.2.2.1 Filtre pas alt



**Fig. 2.9** A l'esquerra, imatge original. A la dreta, imatge filtrada.

#### 2.3.2.2.2 Filtre high boost



**Fig. 2.10** A l'esquerra, imatge original. A la dreta, imatge filtrada.

## 2.4 Exemple de pas baix per a l'estimació de la component atmosfèrica

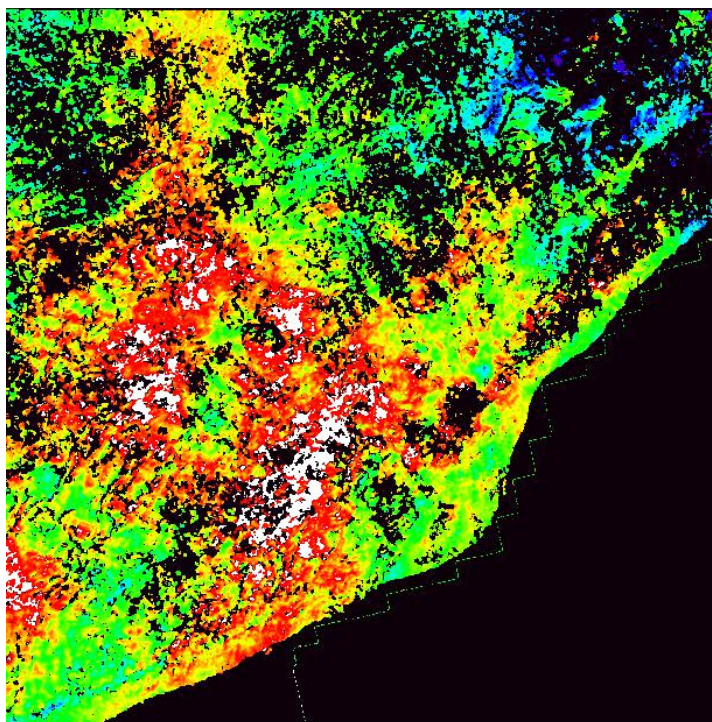


Fig. 2.11 Imatge original.

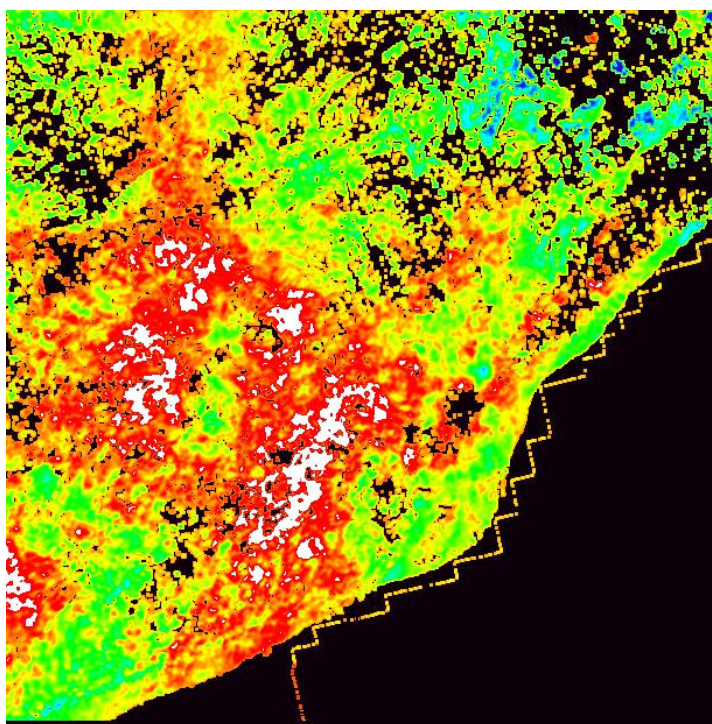


Fig. 2.12 Imatge filtrada.

## ANNEX 3. PROGRAMES

### 3.1 Programa conversor BIN-ASCII (llenguatge C)

```

/*
 / PROGRAMA per transformar rasters binaris en graelles d'ASCII:
 / Input: raster ncol*nlines (format binari)
 / Output: graella ASCII (format enter, enter, enter, float; N, X, Y, Z; Z=fase )
*/

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>
#include <new.h>

/*
 / Programa principal:
*/

void main(void) {

    FILE *pdam,*pout;
    int obert=0, obert1=0;
    char inp_name[50], inp_name1[50];
    int i,salta,punt=0;
    int nlines,ncol, noinfo,conta=0;
    int x=0, y=0;
    float *buf,*buf1;

    while (obert==0) {          /* Obrir fitxer entrada */
        printf(" Introduir el nom del fitxer d'entrada:\n");
        scanf("%s", inp_name);
        pdam=fopen(inp_name,"rb");
        if (pdam==NULL) {
            printf("\n\tError obrint fitxer!\n");
        }
        else {
            obert=1;
        }
    }

    while (obert1==0) {        /* Obrir fitxer de sortida */
        printf(" Introduir el nom del fitxer de sortida:\n");
        scanf("%s", inp_name1);
        pout=fopen(inp_name1,"w");
        if (pout==NULL) {
            printf("\n\tError obrint fitxer!\n");
        }
        else {
            obert1=1;
        }
    }

    printf(" Introduir el nombre de línies:\n");
    scanf("%d", &nlines);

```

---

```
printf(" Introduir el nombre de columnes:\n");
scanf("%d", &ncol);
printf(" Introduir el píxel sense informació:\n");
scanf("%d", &noinfo);

salta=nlines*ncol;

buf=(float *)malloc(sizeof(float)*salta);
buf1=buf;

fread((float*)buf,sizeof(float),salta,pdam);

for(i=0; i<salta; i++)
{
    if(x==ncol)
    {
        x=1;
        y++;
    }

    else
    {
        x++;
    }

    if (buf[i]!=buf[noinfo])
    {
        conta++;
        fprintf(pout, "%d\t%d\t%d\t%f\n", conta, x, y, buf[i]);
    }
}

printf(" Programa acabat!\n");

fclose(pdam);
fclose(pout);
free(buf);
return;
}
```

### 3.2 Programa conversor ASCII-BIN (llenguatge C)

```

/*
 / PROGRAMA per transformar graelles d'ASCII a binari:
 / Input: ncol*nlines vegades X,Y,Z (float)
 / Output: graella binaria (float)
*/

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>

/*
 / PROGRAMA PRINCIPAL:
*/

void main(void) {

    FILE *pdam,*pout;
    int obert=0, obert1=0;
    char inp_name[50], inp_name1[50];
    int i,salta;
    int nlines,ncol,conta=0;
    float z;
    int x, y;
    float *buf,*buf1;

    while (obert==0) {          /* Obrir fitxer entrada */
        printf(" Introduir el nom del fitxer d'entrada\n");
        scanf("%s", inp_name);
        pdam=fopen(inp_name,"r");
        if (pdam==NULL) {
            printf(" \n\tError obrint fitxer!\n");
        }
        else {
            obert=1;
        }
    }

    while (obert1==0) {        /* Obrir fitxer de sortida */
        printf(" Introduir el nom del fitxer de sortida\n");
        scanf("%s", inp_name1);
        pout=fopen(inp_name1,"wb");
        if (pout==NULL) {
            printf(" \n\tError obrint fitxer!\n");
        }
        else {
            obert1=1;
        }
    }

    printf(" Introduir el nombre de línies\n");
    scanf("%d", &nlines);
    printf(" Introduir el nombre de columnes\n");
    scanf("%d", &ncol);
    printf(" Introduir el nombre de punts\n");
    scanf("%d", &salta);

```

---

```
buf=(float *)malloc(sizeof(float)*nlines*ncol);
buf1=buf;

    for(i=0; i<nlines*ncol;i++)
    {
        buf[i]=-10.003;
    }

    for(i=0; i<salta; i++)
    {

        fscanf(pdam," %d %d %f ", &x,&y,&z);
        buf[ncol*(y-1)+(x-1)]=(float)z;
    }

    fwrite((float*)buf, sizeof(float), nlines*ncol, pout);

printf(" Programa acabou!\n");

fclose(pdam);
fclose(pout);
free(buf);
return;
}
```

### 3.3 Programa de filtres (llenguatge C)

```

/*
 / PROGRAMA de filtratge de graelles d'ASCII:
 / Input: graella ncol*nlines (format ASCII)
 / Output: graella filtrada i interpolada ncol*nlines (format ASCII)
*/

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <new.h>

void main()
{
    int i, j, f, m, n;
    int lin, col, lon, opcio, x, y, centre;;
    int dim, final;
    float suma=0.0, producte=0.0, mitja=0.0, z=0.0, pes=0.0, veinat=0.0, A=0.0, aux=0.0;
    float **M;
    float **MF;
    float **F;
    char nomfin[20], nomfout[20];
    FILE *fin, *fout;

    /*introduir les línies i columnes de les matrius*/
    printf("Introduir el nombre de línies:\n");
    scanf("%d", &lin);

    printf("Introduir el nombre de columnes:\n");
    scanf("%d", &col);

    /*introduir les dimensions de les mascare*/
    printf("Introduir les dimensions de la mascara:\n");
    scanf("%d", &dim);

    /*Introduir les línies del fitxer*/
    printf("Introduir el numero de línies del fitxer d'entrada:\n");
    scanf("%d", &lon);

    M=new float*[lin];

    for(i=0; i<lin;i++)
        M[i]=new float[col];

    MF=new float*[lin];

    for(i=0; i<lin;i++)
        MF[i]=new float[col];

    F=new float*[dim];

    for(i=0; i<dim;i++)
        F[i]=new float[dim];

```

```

/*introduir el nom del fitxer*/
printf("Introduir el nom del fitxer d'entrada:\n");
scanf("%s%c", nomfin);
printf("%s\n", nomfin);

printf("Introduir el nom del fitxer de sortida:\n");
scanf("%s%c", nomfout);
printf("%s\n", nomfout);

/*obrir els fitxers*/
/*fitxer entrada, nomes de lectura*/

fin=fopen(nomfin, "r");
if(fin==NULL)
{
    printf("Error obrint fitxer de dades %s\n", nomfin);
    exit(0);
}

/*fitxer de sortida, nomes d'escriptura*/

fout=fopen(nomfout, "w");
if(fout==NULL)
{
    printf("Error obrint fitxer de dades %s\n", nomfout);
    exit(0);
}

/*inicialitzacio de la matriu M a 0*/
for (i=0; i<lin; i++)
{
    for (j=0; j<col; j++)
    {
        M[i][j]=0.0;
    }
}

/*llegir fitxer i guardar dades a la matriu P de 3 columnes, x y (coordenades píxel), z (fase píxel)*/
for(f=0; f<lon; f++)
{
    fscanf(fin, "%d", &x);
    fscanf(fin, "%d", &y);
    fscanf(fin, "%f", &z);

    M[x-1][y-1]=z;
}

/*creacio de la mascara de convolucio*/

for (m=0;m<dim;m++)
{
    for (n=0;n<dim;n++)
    {
        F[m][n]=0.0;
    }
}

centre=(dim/2);

```



```

/*-----escollir el filtre espacial-----*/
/*
    filtre pas baix o mitjana          =opcio 1
    filtre mediana                    =opcio 2
    filtre pas alt                     =opcio 3
    filtre high boost                 =opcio 4
    filtre entrat per usuari          =opcio 5*/

printf("Escull el tipus de filtre:\n");
printf("Opcio 1 = filtre pas baix o mitjana\n");
printf("Opcio 2 = filtre mediana\n");
printf("Opcio 3 = filtre pas alt\n");
printf("Opcio 4 = filtre high boost\n");
printf("Opcio 5 = filtre usuari\n");
scanf("%d", &opcio);

switch(opcio)
{
    case 1:
/*-----filtre pas baix-----*/

        for (m=0;m<dim;m++)
        {
            for (n=0;n<dim;n++)
            {
                F[m][n]=1.0;
                printf("%f ", F[m][n]);
            }
        }
        break;

    case 2:
/*-----filtre de mediana-----*/

        printf("Introdueix el pes del valor central: \n");
        scanf("%f", &pes);

        for (m=0;m<dim;m++)
        {
            for (n=0;n<dim;n++)
            {
                F[m][n]=1.0-pes;
            }
        }
        F[centre][centre]=pes;

        for (m=0;m<dim;m++)
        {
            for (n=0;n<dim;n++)
            {
                printf("%f ", F[m][n]);
            }
        }

        break;

    case 3:

```

```

/*-----filtre pas alt-----*/
    for (m=0;m<dim;m++)
    {
        for (n=0;n<dim;n++)
        {
            F[m][n]=-1.0;
        }
    }
    F[centre][centre]=float((dim*dim))-1.0;

    for (m=0;m<dim;m++)
    {
        for (n=0;n<dim;n++)
        {
            printf("%f ", F[m][n]);
        }
    }

    break;

    case 4:
/*-----filtre high-boost-----*/

    printf("Introdueix el factor d'amplificacio A>=1: \n");
    scanf("%f", &A);

    for (m=0;m<dim;m++)
    {
        for (n=0;n<dim;n++)
        {
            F[m][n]=-1.0;
        }
    }
    F[centre][centre]=((dim*dim)*A)-1.0;

    for (m=0;m<dim;m++)
    {
        for (n=0;n<dim;n++)
        {
            printf("%f ", F[m][n]);
        }
    }

    break;

    case 5:
/*-----filtre usuari-----*/

    printf("Introdueix el pes central:\n");
    scanf("%f", &pes);
    printf("Introdueix el pes del veinat:\n");
    scanf("%f", &veinat);

    for (m=0;m<dim;m++)
    {
        for (n=0;n<dim;n++)
        {
            F[m][n]=1.0;
        }
    }

```

```

F[centre][centre]=pes;

F[0][centre]=veinat;
F[centre][centre+1]=veinat;
F[centre][0]=veinat;
F[centre+1][centre]=veinat;

for (m=0;m<dim;m++)
{
    for (n=0;n<dim;n++)
    {
        printf("%f ", F[m][n]);
    }
    break;
}

/*filtrat*/

for(i=0; i<lin; i++)
{
    for(j=0; j<col; j++)
    {
        MF[i][j]=M[i][j];
    }
}

final=dim-1;

for(i=0; i<lin-final; i++)
{
    for(j=0; j<col-final; j++)
    {
        for(m=0; m<dim; m++)
        {
            for(n=0; n<dim; n++)
            {
                aux=M[i+m][j+n];
                producte=M[i+m][j+n]*F[m][n];
                suma=suma+producte;
            }
        }
        if(suma!=0.0)
        {
            mitja=suma/9.0;
            MF[i+1][j+1]=mitja;
            fprintf(fout, "%d\t%d\t%f\t\n", i+1, j+1, mitja);
        }
        suma=0.0;
        producte=0.0;
    }
}

fclose(fin);
fclose(fout);
}

```